

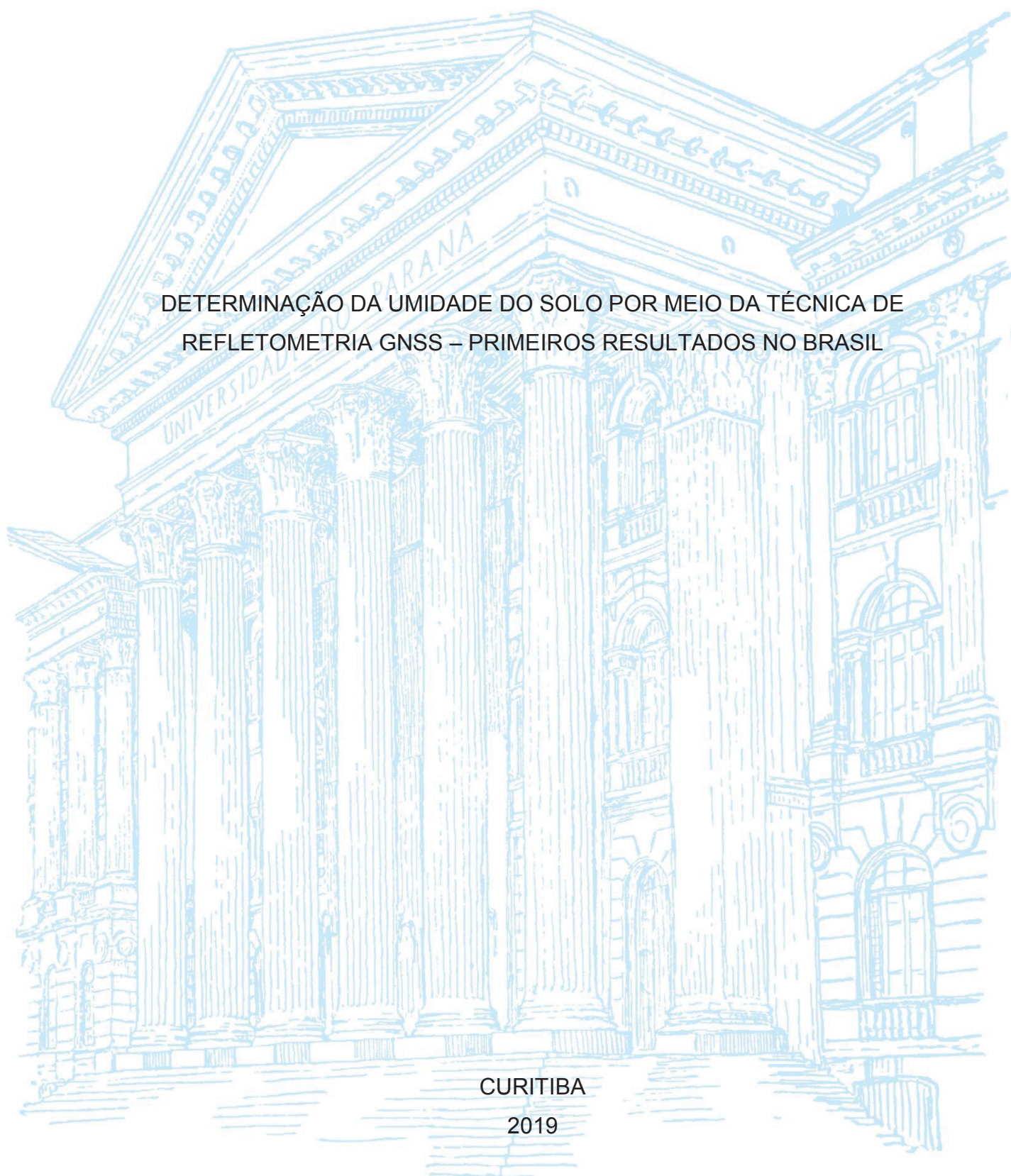
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JORGE FELIPE EURIQUES

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DA TÉCNICA DE
REFLETOMETRIA GNSS – PRIMEIROS RESULTADOS NO BRASIL

CURITIBA

2019



JORGE FELIPE EURIQUES

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DA TÉCNICA DE
REFLETOMETRIA GNSS – PRIMEIROS RESULTADOS NO BRASIL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientadora: Profa. Dra. Claudia Pereira Krueger

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Geremia Nievinski

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

E89d

Euriques, Jorge Felipe

Determinação da umidade do solo por meio da técnica de refletometria GNSS – primeiros resultados no Brasil [recurso eletrônico] / Jorge Felipe Euriques. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2019.

Orientador: Claudia Pereira Krueger – Coorientador: Felipe Geremia Nievinski.

1. Solos – Umidade. 2. Sistema de Posicionamento Global. 3. Satélites artificiais em sensoriamento remoto. I. Universidade Federal do Paraná. II. Krueger, Claudia Pereira. III. Nievinski, Felipe Geremia. IV. Título.

CDD: 631.432

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6


TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JORGE FELIPE EURIQUES** intitulada: **DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DA TÉCNICA DE REFLETOMETRIA GNSS - PRIMEIROS RESULTADOS NO BRASIL**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.


A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Março de 2019.


CLAUDIA PEREIRA KRUEGER
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


WAGNER CARRUPT MACHADO
Avaliador Externo (UFU)


REGIANE DALAZOANA
Avaliador Interno (UFPR)


PAULO SÉRGIO DE OLIVEIRA JUNIOR
Avaliador Externo (UFPR)

Dedico esta dissertação à minhas amadas, Claudete, Ana Carolina, Évelin e Claudia, com todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Dois anos se passaram como num piscar de olhos! Ainda assim, ao escrever estas palavras, é enorme a quantidade de nomes que me vem à cabeça, pois foi longo o caminho percorrido até chegar nesse momento.

Este texto simboliza o sentimento de gratidão a todos que contribuíram comigo, não apenas diretamente na realização desta pesquisa, mas em todos os aspectos da minha formação como pessoa. Entretanto, devo me limitar a destacar apenas as pessoas e instituições relacionadas ao meu período de mestrado, pois caso contrário, muitas páginas seriam necessárias.

Primeiramente agradeço a pessoa mais importante da minha vida, a qual acumula diversas postos, sendo a minha primeira professora, a pessoa responsável pela minha criação e educação, minha amiga, minha mãe, Claudete. Foi ela quem me ensinou, através do exemplo, a ter gosto pela leitura, me ensinou que qualquer tarefa que você faça, não importando qual seja, deve ser feita com dedicação e amor, e principalmente, me ensinou a seguir em frente e que os problemas não são tão grandes como parecem ser.

Minha mãe teve como mestres pessoas com quem felizmente também tive o privilégio de aprender: minha avó, a doutora *Honoris Causa*, titulação por mim concedida, Maria Ribeiro (*in memoriam*), a gatona. Ela foi minha segunda professora, e foi uma referência de sabedoria, de valores, de fé, não somente por mim e por minha família, mas em sua comunidade; e meu avô Altino, que ao ter sido alfabetizado com sessenta e tantos anos de idade, me ensinou desde cedo que nunca é tarde para aprender! Mais do que isso, me ensinou que tudo o que precisamos é de oportunidades e incentivo. A ele agradeço por ter sido meu aluno de infância mais aplicado, já que meu irmão Fernando, o Piko, nunca gostou de “brincar de escola”. Nesse gancho familiar, em se tratando da família biológica, agradeço aos meus irmãos Gi, Fernando, Larissa, Ane e Fabrício.

À Ane, a *Coucou*, faço um agradecimento especial, pois acompanhei de perto o seu crescimento, de criança que era quando entrei na graduação, passou a “pré-adolescente” como ela se auto declarava, para a adolescente que é hoje, prestes a fazer o vestibular. Agradeço pela amizade e pela pessoa que ela se tornou.

À Claudia Krueger, minha amiga, professora, e orientadora no âmbito profissional e pessoal, os quais pra nós não têm muita distinção, pois como dois bons

exemplares de signos da água, fazemos tudo com intensidade, com o coração. Ela exerce essa função desde 2014, quando comecei a iniciação científica, posteriormente no projeto de conclusão de graduação, no mestrado e é atualmente no doutorado, o qual estou cursando. A ela agradeço pelos inúmeros e constantes ensinamentos, por confiar e acreditar no meu potencial, por todas as oportunidades e incentivos. A ela agradeço pelo exemplo de amor a profissão de professora e pesquisadora, a enxergar problemas científicos a serem investigados por todos os lados. Pra mim, a expressão “como uma mãe” nunca fez tanto sentido.

À Évi, minha irmã do coração, a irmã que eu escolhi, ou melhor, que reconheci! Pois foi assim, em 2010 quando começamos a graduação, quando fizemos o primeiro trabalho juntos, nos reconhecemos, e a partir daí não teve mais Jorge sem Évelin. Agradeço a ela por ser o meu porto seguro, por estar sempre comigo, por me incentivar e torcer por mim, ser a minha parceira! E falando em parceria, nesse mesmo contexto agradeço ao meu amigo, Allan, pela parceria diária, um irmão com quem sempre posso contar, e pelas piadas que de tão sem graça, acabam sendo engraçadas.

À Carla, Carol, e Mariana, amigas brasileiras que a França me deu, que continuam sendo amigas presentes, mesmo que distantes fisicamente.

Agradeço ao Luis Felipe, meu querido, por estar presente desde 2014.

Agradeço à Casa do Estudante Universitário do Paraná, a CEU, local que me acolheu durante a graduação e parte do mestrado e me proporcionou uma vivência única. Nesta residência universitária, a maior da América Latina, tive a oportunidades de conviver com pessoas do Brasil e do mundo, estudantes de uma infinidade de cursos, gostos, preferências, identidades e particularidades e com eles aprender, é isso, aprendizado... essa palavra define o período em que estive na CEU. É uma verdadeira escola da vida.

Lá eu construí uma segunda família, a de amigos que vou levar comigo para o resto da vida, dos quais destaco meu irmão Júlio d'Oxóssi, como artista nato e autêntico que é, muito me ensinou e sempre está torcendo por mim, sempre me incentivou e o melhor, me resgatava quando eu estava imerso em algum trabalho que parecia ser impossível de fazer: “Depois você faz, vai dar tempo, relaxa”, dizia. No fim ele sempre tinha razão.

Após certo tempo comecei a ouvir frases semelhantes de um amigo que amo e admiro muito, Gabriel, que na noite de Paris atende pelo pseudônimo de Geni, sem

dúvidas uma das pessoas mais malucas que conheço. Se eu fechar os olhos inúmeros momentos engraçados me veem a cabeça em se tratando do Gabriel...quantas gargalhadas!

Inúmeros outros brothers e manas da CEU foram fundamentais e contribuíram muito comigo e deveriam ser citados, contudo para não me alongar ainda mais, agradeço a todo Jequití, em especial a Família Rolê Eterno, com os quais tive o privilégio de compartilhar momentos incríveis entre festas, saraus, mas também em trabalhos conjuntos e debates abordando os mais diversos temas, nos quais muito aprendi. Assim, agradeço também a minha véia Tiago Tuminski, pela amizade e por me aturar durante todo esse tempo. Agradeço também ao Luis Marcio e ao Breno, que assumiam o lugar do Ti nos finais de semana.

De forma geral, a todas as amigas e amigos da CEU, expresso meus sinceros agradecimentos. Muito orgulho de ser Ceuense!

Ao Luan Ricardo, pelo carinho e apoio enchendo a minha bola, mas também por cortar o meu barato por diversas vezes jogando um “foca no mestrado”.

Ao Gui Hayama, pelo carinho, e por ter sido presente, mesmo que do outro lado do mundo.

À UFPR, e toda sua comunidade acadêmica agradeço de coração por todas as oportunidades e pela transformação que ela me proporcionou, assim, em tempos de contingenciamento de verbas para a Educação, lembro as palavras de Nelson Mandela:

“A educação é o grande motor do desenvolvimento pessoal. É através dela que a filha de um camponês se torna médica, que o filho de um mineiro pode chegar a chefe de mina, que um filho de trabalhadores rurais pode chegar a presidente de uma grande nação.”

Assim, agradeço a todos os que possibilitaram e fazem da UFPR uma universidade pública de qualidade e excelência.

Agradeço a todos os membros do PPGCG

Especialmente as professoras: Luciene Delazari, Silvana Camboim, Claudia Robbi; e o professor Ivandro Klein.

À Monica, secretária, por todo o auxílio envolvendo as questões burocráticas e necessárias e pelos inúmeros galhos quebrados.

Aos colegas e amigos alunos do PPGCG, em especial ao Fabiano, pelo carinho, parceria, apoio diário, e companheirismo; ao Sérgio, Edu, e Leandro, amigos que sempre dão uma força.

Ao agradecer ao LAGEH me direciono a todos os colegas e amigos membros da nossa bolha social, ou que passaram por lá. Aqui no nosso reduto, isolado no campus, e não meramente conhecido como “LONGE”, acabamos formando uma família, e não poderia ser diferente, afinal passamos 50% do nosso dia compartilhando esses 50 m², e daí vem o segundo apelido “LARgeh”. Agradeço a todos, pelo apoio, pelo aprendizado, pelas dicas e pelos momentos de descontração durante aquela pausa pro café.

Como membros externos, mas não menos importantes do LAGEH Agradeço à Renata (Orbenck Adm e Serviços), que, com toda sua espontaneidade me proporcionou momentos de descontração durante as faxinas das quintas-feiras; ao Professor Tobias Bleninger; as Professoras Maria Cecília Brandalize, e Selma Aranha Ribeiro, e também as queridas Mari e a Tania (LABTOPO).

Agradeço aos funcionários do RU, principalmente à Solange, Andreia, Vesse, Odir e Tay.

Ao professor Felipe Nievinski, meu coorientador de mestrado e atualmente no doutorado, por todo o aprendizado, ajuda e orientação, sem o qual este trabalho não teria sido possível. Através do mesmo, agradeço à UFRGS.

Ao INPE pelo fornecimento dos dados usados nesta pesquisa, esclarecimento de dúvidas, e apoio. Em especial ao Professor Luiz Fernando Sapucci.

Agradeço a banca avaliadora desta pesquisa pelas sugestões, correções e demais contribuições: Professora Regiane Dalazoana, Professor Paulo Sérgio de Oliveira Júnior, e Professor Wagner Carrupt Machado

Agradeço também à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento da bolsa.

Por fim, peço desculpas antecipadas para o caso de não ter citado alguém, já me justifico declarando que esse texto foi escrito às pressas, pois felizmente aqui no LAGEH fazemos diversas pesquisas ao mesmo tempo, então estamos sempre correndo. Gratidão!

A alegria não chega apenas no encontro do achado, mas faz parte do processo da busca. E ensinar e aprender não pode dar-se fora da procura, fora da boniteza e da alegria. (PAULO FREIRE, 1996, p.16.)

RESUMO

A umidade do solo se refere ao conteúdo de água presente na zona insaturada do solo, a qual não se distribui espacialmente de maneira homogênea. Esta grandeza está relacionada: aos ciclos biogeoquímicos; aos fluxos de energia entre a superfície física da Terra e a atmosfera; à agricultura, sendo essencial nos sistemas de manejo e irrigação; ao projeto e monitoramento de obras de engenharia; e são dados fundamentais para modelos de delimitação de áreas de inundação, enchentes, ou mesmo de recarga de águas subterrâneas. A determinação da umidade do solo é efetuada por dois modos: 1) Métodos diretos como o Gravimétrico, que é acurado, mas é laborioso, pois requer a coleta de amostras do solo. 2) Métodos indiretos, onde explora-se propriedades que se relacionam com esta grandeza. Sondas de capacitância são autônomas e exploram a permissividade do solo, contudo, têm precisão limitada e também como no gravimétrico, proporcionam medidas pontuais. Sondas que determinam a umidade precisamente a partir da avaliação da moderação na intensidade de nêutrons rápidos, as quais abrangem uma área de centenas de metros, contudo têm custo elevado. Existem missões satelitais específicas para monitoramento global da umidade do solo, porém estas informações são muito generalizadas, tendo resolução espacial de dezenas de quilômetros. A Refletometria GNSS por Multicaminho (GNSS-MR), é uma recente técnica da Geodésia que permite realizar sensoriamento remoto à curta distância através das oscilações que o multicaminho gera na Razão Sinal-Ruído (SNR). O multicaminho é o efeito da combinação dos sinais GNSS diretos, de interesse ao posicionamento, e dos sinais que chegam a antena de maneira indireta, após refletirem e interagirem com as superfícies do entorno, os quais degradam as observáveis, prejudicando o posicionamento acurado. Dada esta interação, os sinais passam a conter informações que podem ser relacionadas às propriedades das superfícies de reflexão, tais como a umidade do solo. Neste âmbito, o GNSS-MR apresenta vantagens sobre os métodos tradicionais como: área de abrangência alcança cerca de 30 m para antenas com altura de ≈ 2 m (Zonas de Fresnel); e utilização de dados de estações GNSS existentes. Nesta pesquisa efetuou-se a avaliação do desempenho do GNSS-MR na determinação da umidade do solo no entorno de uma estação localizada no município de Cachoeira Paulista - SP. Para isto, utilizou-se dados GNSS referentes a uma campanha com 16 meses de duração (Junho de 2014 a outubro de 2015) a partir dos quais se obteve séries temporais de umidade do solo por diferentes sinais via algoritmo refletométrico desenvolvido por Nievinski e Larson (2013, 2014a, 2014b, 2014c), o qual foi adaptado para emprego na determinação de umidade do solo por Tabibi et al. (2015). A avaliação foi efetuada mediante comparação com séries determinadas por 3 sondas de capacitância e 1 sonda de nêutrons da rede COSMOS. Obteve-se correlação superior a 73% entre o sinal GLONASS RS2P com os dados da sonda COSMOS, com RMSE $0,0157\text{m}^3/\text{m}^3$. Desta forma, o GNSS-MR surge como método alternativo na determinação da umidade do solo.

Palavras-chave: GNSS-R. Umidade do Solo. SNR. Multicaminho.

ABSTRACT

Soil moisture refers to the water content present in the unsaturated zone of the soil, which is not spatially distributed in a homogeneous manner. This greatness is related to biogeochemical cycles, to the flows of energy between the physical surface of the Earth and the atmosphere, to agriculture, being essential in the management and irrigation systems, to the project and monitoring of engineering works and are fundamental data for models of delimitation of inundation areas, floods, or even of recharge of underground waters. Soil moisture determination is performed by two modes: 1) Direct methods such as gravimetric, which is accurate, but is laborious, because it requires the collection of soil samples. 2) Indirect methods, where it explores properties that relate to this greatness. Capacitance probes are autonomous and exploit the permissiveness of the soil, however, have limited precision and also as in gravimetric, provide punctual measurements. Probes that determine soil moisture precisely from the evaluation of moderation in the intensity of fast neutrons, which cover an area of hundreds of meters, however have high cost. There are specific satellite missions for global monitoring of soil moisture, however these measurements are very generalized, with spatial resolution of tens of kilometers. The GNSS Reflectometry by multipath (GNSS-MR), is a recent technique of Geodesy that allows to realize remote sensing at short distance through the oscillations that the multipath generates in the signal-to-noise ratio (SNR). The multipath is the effect of the combination of direct GNSS signals, of interest to positioning, and the signals that arrive at the antenna in an indirect way, after reflecting and interacting with the surrounding surfaces, which degrade the observables, damaging the accurate positioning. Given this interaction, the signals will contain information that may be related to the properties of reflection surfaces, such as soil moisture. In this context, GNSS-MR presents advantages over traditional methods such as: area of coverage reaches about 30 m for antennas with height of ≈ 2 m (Fresnel zones); and use of data from existing GNSS stations. In this research the GNSS-MR performance was evaluated in the determination of soil moisture in the vicinity of a station located in the city of Cachoeira Paulista-SP. For this, GNSS data collected during a 16-month campaign were used (June 2014 to October 2015) from which the temporal series of soil moisture was obtained by different signals via the reflectometric algorithm developed by Nievinski and Larson (2013, 2014a, 2014B, 2014c), which was adapted for use in determining soil moisture by Tabibi et al. (2015). The evaluation was performed by comparing the series determined by 3 capacitance probes and 1 neutron probe of the COSMOS network. A correlation higher than 73% between the GLONASS RS2P signal and the COSMOS probe data was obtained, with RMSE $0,0157\text{m}^3/\text{m}^3$. In this way, GNSS-MR emerges as an alternative method for soil moisture determination.

Keywords: GNSS-R. Soil Moisture. SNR. Multipath.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SISTEMA CLIMÁTICO GLOBAL	22
FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE NO SOLO	23
FIGURA 3 – SONDA FDR (CAPACITÂNCIA)	26
FIGURA 4 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE TENSÃO E UMIDADE.....	26
FIGURA 5 – RAIOS CÓSMICOS E CASCATA	28
FIGURA 6 – FONTES DE ERROS.....	32
FIGURA 7 – OBSERVÁVEIS SNR POR DIFERENTES SINAIS.....	36
FIGURA 8 – MULTICAMINHO	37
FIGURA 9 – POLARIZAÇÃO RHCP	40
FIGURA 10 – POLARIZAÇÃO LHCP	40
FIGURA 11 – POLARIZAÇÃO DOS SINAIS	41
FIGURA 12 – GANHO PADRÃO DE UM DADO MODELO DE ANTENA GNSS.....	42
FIGURA 13 – DIAGRAMA FASORIAL	45
FIGURA 14 – ZONA DE FRESNEL	50
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA	58
FIGURA 16 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	59
FIGURA 17 – TOPOGRAFIA DA ÁREA DE ESTUDO.....	59
FIGURA 18 – VISTA PANORÂMICA OESTE	60
FIGURA 19 – VISTA PANORÂMICA LESTE	60
FIGURA 20 – DISPOSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	61
FIGURA 21 – EQUIPAMENTOS GNSS.....	62
FIGURA 22 – SONDA PR1	63
FIGURA 23 – SONDA COSMOS CPTEC INPE.....	64
FIGURA 24 – SISTEMA COSMOS	65
FIGURA 25 – COMPONENTES DA SONDA COSMOS	66
FIGURA 26 – PERFIL DE UMIDADE DO SOLO POR UMA SONDA PR1	68
FIGURA 27 – DADOS SONDA COSMOS.....	69
FIGURA 28 – PROFUNDIDADE EFETIVA PELA SONDA COSMOS.....	70
FIGURA 29 – OSCILAÇÕES SNR	72
FIGURA 30 – TRAJETÓRIAS DOS SATÉLITES	73
FIGURA 31 – VISTA LESTE DA ESTAÇÃO GNSS	73
FIGURA 32 – OBSERVÁVEIS SIMULADAS.....	75

FIGURA 33 – OBSERVÁVEIS SIMULADAS E MEDIDAS	77
FIGURA 34 – VARIAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA.....	78
FIGURA 35 – DESLOCAMENTO DE FASE.....	79
FIGURA 36 – UMIDADE DO SOLO ATRAVÉS DAS SONDAS PR1	82
FIGURA 37 – SÉRIES TEMPORAIS PR1.....	83
FIGURA 38 – DISCREPÂNCIA ENTRE AS SÉRIES DAS SONDAS B E C	84
FIGURA 39 – DISCREPÂNCIA DAS SONDAS B E C EM FUNÇÃO DA UMIDADE	84
FIGURA 40 – DISPERSÃO ENTRE SONDAS PR1	85
FIGURA 41 – COMPARAÇÃO DA SONDA B X PRECIPITAÇÃO	86
FIGURA 42 – SÉRIE TEMPORAL SONDA COSMOS.....	87
FIGURA 43 – SÉRIE TEMPORAL COSMOS.....	88
FIGURA 44 – SÉRIE TEMPORAL DA SONDA COSMOS X PRECIPITAÇÃO	88
FIGURA 45 – SÉRIES TEMPORAIS GNSS-MR VIA DIFERENTES SINAIS GNSS.....	89
FIGURA 46 – DETALHE SÉRIES TEMPORAIS GNSS-MR	90
FIGURA 47 – CORRELAÇÃO ENTRE AS SÉRIES TEMPORAIS.....	92
FIGURA 48 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO ENTRE AS SÉRIES TEMPORAIS	93
FIGURA 49 – SÉRIES DE UMIDADE DO SOLO GNSS-MR (RS2P e RS1P)	93
FIGURA 50 – SÉRIES TEMPORAIS DE UMIDADE DO SOLO (RS2P)	94
FIGURA 51 – UMIDADE DO SOLO (3 PRIMEIROS MESES)	95
FIGURA 52 – DISPERSÃO: RS2P X COSMOS	95
FIGURA 53 – DISCREPÂNCIA: RS2P X COSMOS	96
FIGURA 54 – CONTROLE DE QUALIDADE: RS2P X COSMOS.....	97
FIGURA 55 – DISPERSÃO: RS2P X SONDAS PR1	98
FIGURA 56 – DISCREPÂNCIA GNSS-MR (RS2P) X SONDA B.....	98
FIGURA 57 – CONTROLE DE QUALIDADE: RS2P X SONDA B.....	99
FIGURA 58 – CORRESPONDÊNCIA GNSS-MR – COSMOS – PRECIPITAÇÃO ...	99
FIGURA 59 – DISPERSÃO GNSS-MR(RS1P) X SONDA C.....	101

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO	91
TABELA 2 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS SÉRIES	91
TABELA 3 – RAIZ DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – RMSE	92

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas
CDMA	- <i>Code Division Multiple Access</i>
CEMADEM	- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.
CPTEC	- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
C/A	- <i>Coarse Acquisition</i>
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	- <i>European Space Agency</i>
FDMA	- <i>Frequency Division Multiple Access</i>
FDR	- <i>Frequency Domain Reflectometry</i>
GLONASS	- <i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
GNSS-R	- <i>Global Navigation Satellite System – Reflectometry</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
ICAO	- <i>International Civil Aviation Organization</i>
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRNSS	- <i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
LHCP	- <i>Left – Hand Circularly Polarised</i>
NASA	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAVSTAR	- <i>Navigation System with Time and Ranging</i>
P	- <i>Precise Code</i>
PNT	- <i>Positioning, Navigation and Timing</i>
PRN	- <i>Pseudo Random Noise</i>
RHCP	- <i>Right – Hand Circularly Polarised</i>
RINEX	- <i>Receiver Independent Exchange Format</i>
Roscosmos	- Agência Espacial da Federação Russa
SMOS	- <i>Soil Moisture and Ocean Salinity satellite</i>
SMAP	- <i>Soil Moisture Active Passive</i>
SNR	- <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TDR	- <i>Time Domain Reflectometry</i>
UFRGS	- Universidade Federal do Rio Grande do Sul
QZSS	- <i>Quasi-Zenith Satellite System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V_A	– Volume de água.
V_S	– Volume de solo.
US	– Umidade do solo.
US_V	– Conteúdo volumétrico de água no solo.
V	– Volts.
P_r	– Profundidade de referência.
eV	– Elétron-Volt.
N	– Taxa de contagem de nêutrons rápidos.
N_0	– Intensidade de nêutrons após interação com o solo.
a_n	– Coeficientes de ajuste da calibração.
GHz	– GigaHerz.
t	– Tempo.
s	– Segundo.
PD_ϕ	– Pseudodistância pela fase da onda portadora.
D	– Distância geométrica entre a antena do receptor e a antena do satélite.
c	– Velocidade de propagação da luz no vácuo.
dt_u	– Erro de sincronismo entre o relógio do receptor e o tempo GPS.
dt_s	– Erro de sincronismo entre o relógio do satélite e o do receptor GPS.
dt_{trop}	– Atraso na propagação do sinal devido a troposfera.
dt_{ion}	– Atraso na propagação do sinal devido a ionosfera.
f_ϕ	– Frequência da onda portadora.
N	– Ambiguidade.
ε	– Demais erros.
MHz	– MegaHertz.
λ	– comprimento de onda.
m	– Metros.
km	– Quilômetros.
min	– Minutos.

cm	– Centímetros.
θ	– Ângulo de incidência do sinal (Elevação do satélite).
ε	– Permissividade elétrica.
ε_r	– Permissividade real relativa.
σ	– Condutividade elétrica.
S	– Desvio padrão da altura da superfície (rugosidade da superfície).
$\overline{E_r}$	– Campo elétrico da onda refletida.
$\overline{E_d}$	– Campo elétrico da onda direta.
$\overline{\overline{R}}$	– Matriz de reflexão.
$\overline{\overline{P}}^S$	– Matriz copolarizada.
$\overline{\overline{P}}^X$	– Matriz cross-polarizada.
R^S	– Coeficientes de reflexão circularmente polarizados copolarizado.
R^X	– Coeficientes de reflexão circularmente polarizados cross-polarizado.
dB	– Decibel.
dB-Hz	– Decibel-Hertz.
A	– Amplitude do sinal.
f	– Frequência do sinal.
φ	– Fase do sinal.
A_d	– Amplitude do sinal direto.
ϕ_d	– Fase do sinal direto.
A_r	– Amplitude do sinal indireto.
A_c	– Amplitude do sinal composto.
ϕ_c	– Fase do sinal composto.
ψ	– Fase relativa do sinal indireto em relação à fase direta.
δ_φ	– Viés nas medidas de fase.
$\delta\phi$	– Erro de fase.
δ	– Trajeto adicional do sinal refletido em função do sinal direto.
h	– Altura da antena.
\dot{h}	– Taxas de variação da altura da antena.

$\dot{\theta}$ – Taxas de variação do ângulo de incidência do sinal GNSS sobre a superfície de reflexão.

P_c – Potência do sinal composto.

P_d – Potência do sinal direto.

P_r – Potência do sinal refletido.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1	UMIDADE DO SOLO.....	22
2.1.1	Determinação da umidade do solo	24
2.1.1.1	Método Gravimétrico	24
2.1.1.2	Método da Reflectometria no Domínio da Frequência.....	24
2.1.1.3	Método das Sondas de Nêutrons de Raios Cósmicos.....	27
2.2	GNSS	29
2.2.1	CONSTELAÇÕES E OBSERVÁVEIS	33
2.2.1.1	SNR.....	35
2.3	REFLEXÃO E MULTICAMINHO.....	37
2.3.1	Polarização do sinal.....	39
2.3.2	Ganho Padrão de Antenas GNSS	41
2.3.3	Modelagem dos sinais refletidos	43
2.3.4	Abrangência das reflexões	49
2.4	REFLETOMETRIA GNSS	51
2.4.1	GNSS-MR.....	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	ÁREA DE ESTUDO	58
3.2	AQUISIÇÃO DOS DADOS	61
3.2.1	Rastreio GNSS	62
3.2.2	Rastreio Sondas PR1	62
3.2.3	Rastreio Sondas COSMOS	64
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS	66
3.3.1	Dados GNSS	67
3.3.2	Dados PR1	68
3.3.3	Dados COSMOS	69
3.4	AVALIAÇÃO DAS REFLEXÕES.....	71

3.5	ALGORITMO REFLETOMÉTRICO	74
3.5.1	Simulações	74
3.5.2	Inversão	76
3.5.3	Pós Processamento.....	77
3.6	CONVERSÃO EM UMIDADE DO SOLO.....	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS PR1.....	81
4.2	SÉRIE TEMPORAL DA SONDA COSMOS.....	86
4.3	SÉRIES TEMPORAIS GNSS-MR.....	89
4.4	AVALIAÇÃO DA AMOSTRAGEM DOS DADOS GNSS	90
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE GNSS-MR E SONDAS	91
4.6	RESULTADOS EM EVIDÊNCIA.....	93
4.6.1	Sinal RS2P	94
4.6.2	Sinal RS1P	100
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

A umidade do solo pode ser definida, de acordo com Seneviratne et al. (2010), como o conteúdo de água presente na zona insaturada do solo, também dita zona vadosa. Esse conteúdo não é distribuído espacialmente de maneira homogênea, desta forma, ele é apresentado em volume em relação a uma dada porção do solo.

Esta grandeza está relacionada aos ciclos biogeoquímicos, principalmente da água e o do carbono, como também aos fluxos e troca de energia entre a superfície física da Terra e a atmosfera. Segundo Ochsner et al. (2013), quantificar a umidade do solo permite alimentar modelos para delimitação de áreas de inundação, de enchentes, e de recarga de águas subterrâneas. Além disto, o conhecimento desta grandeza é essencial nos sistemas de irrigação de áreas agrícolas e na geotecnia.

De acordo com Silva Júnior et al. (2013), a determinação da umidade do solo é efetuada através de métodos diretos e indiretos. O gravimétrico (Estufa) é um método direto, sendo a umidade do solo determinada em laboratório a partir de uma amostra de solo da área de interesse. Este método é muito acurado, contudo, é moroso e proporciona determinações pontuais, pois é definido a partir de amostras.

Nos métodos indiretos utilizam-se instrumentos que exploram propriedades físicas do solo que variam em função do volume de água nele contido. Nestes casos, a umidade do solo é inferida indiretamente através de uma relação empírica entre a propriedade explorada e a umidade do solo. (COSTA, 2017).

Segundo Mendes (2006), as principais propriedades exploradas para esta finalidade são a permissividade, pressão, tensão, bem como, pode-se avaliar a moderação de nêutrons rápidos, a qual está diretamente ligada à presença de átomos de hidrogênio.

Dentre estes instrumentos, estão as sondas baseadas em sensores dielétricos que exploram a permissividade do solo. Estas sondas têm como vantagens a autonomia e o armazenamento contínuo dos dados por longos períodos (SILVA JÚNIOR et al., 2013). Porém, estes resultados também são considerados pontuais, visto que a área de influência destes equipamentos é de poucos centímetros no entorno da sonda.

As sondas que estimam a umidade através da variação na moderação de nêutrons rápidos provenientes de fontes ativas, quando o próprio equipamento emite radiação, ou passivas, como no caso de raios cósmicos, abrangem uma área de

centenas de metros no entorno da sonda e permitem o registro amplo e autônomo dos dados, entretanto têm custo elevado.

Missões satelitais como a SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity satellite*), da ESA (*European Space Agency*), e SMAP (*Soil Moisture Active Passive*), da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), foram desenvolvidas com o intuito de prover um monitoramento da umidade do solo em nível global. Contudo, conforme Vey et al. (2016), através destas missões se tem resolução espacial de dezenas de quilômetros. Além disto, a resolução temporal está ligada a uma nova passagem do satélite sobre o mesmo local, o que inviabiliza seu emprego em muitas aplicações, devido a estas informações serem muito generalizadas, como no caso da agricultura.

A definição do método e propriedade a serem exploradas na determinação da umidade do solo deve estar de acordo com fatores como: a aplicação; dimensões, características e composição da área de interesse; disponibilidade e limitações específicas do equipamento a ser utilizado.

A Refletometria GNSS ou GNSS-R, do inglês *Global Navigation Satellite System – Reflectometry*, é um recente desenvolvimento da Geodésia que pode ser caracterizado, de acordo com Teunissen e Montenbruck (2017), como uma técnica que permite a realização de sensoriamento remoto a curta distância, explorando-se sinais GNSS.

Por meio do GNSS-R se pode obter atributos quantitativos como a diferença de altura entre a antena e a superfície de reflexão, como na variação da altura de camadas de neve (NIEVINSKI, 2013), nível do mar (LOFGREN, 2014), e crescimento de vegetação (ZHANG et al., 2017), assim como atributos qualitativos, como a umidade do solo (TABIBI et al., 2015).

Esta técnica emprega os sinais emitidos de maneira contínua pelos satélites de constelações GNSS, os quais são ondas eletromagnéticas que incidem diretamente na antena, ou indiretamente, após refletirem nas superfícies de entorno. No segundo caso são registrados com um atraso de tempo devido ao percurso adicional efetuado em relação ao sinal direto.

Os sinais indiretos têm suas características como amplitude, fase e a frequência alteradas a partir da interação com as superfícies refletoras. As alterações dependem de características da superfície refletora como a composição, propriedades dielétricas e rugosidade, assim como do ângulo de incidência do sinal e da altura da

antena. Com isto, o sinal indireto passa a conter características que permitem estimar atributos acerca destas superfícies refletoras (ZAVOROTNY et al, 2015).

De acordo com Roussel (2015), uma das potencialidades do GNSS-R, reside no fato de que as determinações inferidas por esta técnica se referem à área de reflexão dos sinais GNSS no entorno da antena. Esta área é variável em função dos satélites observados, da altura da antena e também da topografia do terreno. Larson (2016), indica que esta área é de aproximadamente 1000,00 m² considerando-se uma antena com altura de 2 metros, sobre uma superfície aproximadamente horizontal e plana.¹

Quando os sinais indiretos se combinam com os sinais diretos proporcionam o efeito do multicaminho, que é uma das fontes de erro do posicionamento GNSS por degradar as observáveis, e conseqüentemente, o posicionamento acurado. Toda antena geodésica está sujeita a recepção de sinais indiretos, portanto, ao efeito do multicaminho.

Com o objetivo de se alcançar o posicionamento com maior acurácia, as antenas geodésicas foram sendo desenvolvidas utilizando-se de artifícios para minimizar a recepção de sinais indiretos, dentre os quais pratos que reduzem a incidência de sinais pelo hemisfério inferior da antena.

Por outro lado, os sinais indiretos são essenciais no GNSS-R. Visando maximizar a recepção destes sinais, tem-se diferentes modos de aquisição de dados para a refletometria que envolvem alterações no equipamento, na posição da antena ou no uso conjunto de antenas em diferentes posições.

A Razão Sinal-Ruído, ou SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio* é uma das observáveis GNSS que é registrada de maneira contínua durante os rastreios. Sendo o SNR sensível ao multicaminho, portanto, aos sinais indiretos, ele pode ser explorado no GNSS-R. Segundo Nievinski et al. (2016), esta categoria do GNSS-R é dita Refletometria GNSS por Multicaminho (GNSS-MR). Uma das vantagens desta categoria é que se pode efetuar determinações refletométricas a partir de rastreios GNSS convencionais, não sendo necessárias quaisquer alterações no equipamento ou na posição da antena receptora.

¹ Definida por meio da Primeira Zona de Fresnel.

A obtenção das informações almejadas na refletometria é dada a partir da determinação do relacionamento entre observações derivadas dos sinais como amplitude, fase e frequência com propriedades referentes as superfícies de reflexão.

O algoritmo refletométrico desenvolvido por Nievinski e Larson (2013, 2014a, 2014b, 2014c), permite efetuar este relacionamento entre parâmetros e observações. Ele abrange dois módulos: o simulador, que é o modelo físico direto; e um rigoroso modelo estatístico inverso.

De acordo com Nievinski (2013), o simulador do multicaminho dá suporte ao GNSS-MR pois permite a ligação explícita das observações GNSS às características do equipamento e do ambiente. Na inversão explora-se os dados GNSS registrados e são determinados os parâmetros reais. Neste contexto, o simulador pode ser utilizado na avaliação da performance teórica em relação a real do efeito do multicaminho. Com isto, o algoritmo permite isolar a influência de efeitos instrumentais e demais condicionantes sobre os parâmetros. Posteriormente, a correspondência entre parâmetros e observações é realizada após terem sido efetuadas inferências estatísticas e o controle de qualidade dos resultados.

Este algoritmo *open source* é disponibilizado para Matlab ou Octave e foi adaptado por Sajad Tabibi, da Universidade de Luxemburgo (TABIBI et al., 2015), para emprego na determinação da umidade do solo.

Neste âmbito, considerando-se que uma antena convencional GNSS está inevitavelmente sujeita ao Multicaminho, pode-se estimar o conteúdo volumétrico de umidade do solo por meio da Refletometria GNSS, através da análise da Razão Sinal-Ruído. Vê-se o GNSS-MR como um método alternativo, apresentando a vantagem de possibilitar determinações relativas à área de entorno da antena. Outras potencialidades são destacadas como a utilização de dados provenientes de estações GNSS já existentes, voltadas ao posicionamento; e o seu emprego na validação dos dados de missões satelitais existentes (SMOS e SMAP).

Nesta pesquisa foi avaliado o desempenho do GNSS-MR na quantificação da umidade do solo e suas variações ao longo do tempo no entorno de uma estação geodésica localizada nas dependências do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista, SP. Utilizou-se dados GNSS dos sistemas GPS (*Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System*) e GLONASS (*Global'naya NAvigatsionnaya Sputnikova Sistema*), provenientes de uma campanha

com duração de 16 meses (junho de 2014 a outubro de 2015). Simultaneamente, a umidade do solo foi monitorada por três sondas de capacitância e uma sonda de nêutrons, estes resultados foram comparados. Além disto, efetuou-se a avaliação frente a eventos de precipitação registrados por meio de um pluviômetro.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram cedidos pelo Professor Doutor Felipe Geremia Nievinski, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e pelo Professor Doutor Luiz Fernando Sapucci, do INPE.

A composição desta pesquisa será apresentada da seguinte forma: na Seção 2 abrange a revisão bibliográfica, na qual estão destacados os principais assuntos relevantes à esta pesquisa; na Seção 3 é apresentado o caminho metodológico, a área de estudo, os equipamentos, a aquisição e tratamento dos dados utilizados; na Seção 4 os resultados e discussões são abordados. Por fim, destaca-se as considerações, conclusões e recomendações para trabalhos futuros (Seção 5).

1.1 JUSTIFICATIVA

O monitoramento do conteúdo volumétrico de umidade do solo é um fator importante em diversas áreas, como: prevenção de desastres naturais através da delimitação de áreas suscetíveis a inundação e enchentes, atividades da geotecnia, no planejamento e monitoramento de obras da construção civil. Além disso, pode ser utilizada como ferramenta no desenvolvimento da agricultura que é uma das bases da economia do Brasil. O manejo e uso eficiente da água são fundamentais na agricultura e de maneira geral na gestão de recursos hídricos.

Existem diferentes métodos de medição do teor de umidade do solo, cada qual com suas limitações e especificidades. A refletometria GNSS é um desenvolvimento da Geodésia que pode ser utilizada em diversas aplicações, dentre as quais no monitoramento da umidade do solo. Diversos estudos foram desenvolvidos nesta temática, cita-se: KATZBERG et al., (2006), LARSON et al. (2008a, 2010), CHEW et al. (2014 e 2015), e TABIBI et al. (2015). Neste último, verificou-se o coeficiente de correlação de 0,693 entre a determinação de umidade do solo por GNSS-MR, através do sinal civil da L2 GPS, e uma sonda *in situ*. O que mostra alta correlação, comprovando que a técnica é adequada para efetuar o monitoramento de umidade do solo.

Poucas pesquisas têm sido efetuadas no Brasil tratando-se desta técnica. Destarte, investigações científicas acerca das potencialidades e limitações desta técnica no tema abordado são necessárias e podem contribuir para a ascensão dela como um método alternativo para o monitoramento da umidade do solo. O que pode contribuir com instituições nacionais como a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), CEMADEM (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), ANA (Agência Nacional de Águas), entre outras.

1.2 OBJETIVOS

Através do objetivo geral, indica-se o que foi ambicionado. Os objetivos específicos indicam as fases efetuadas que permitiram orientar o desenvolvimento da pesquisa, questionar as hipóteses as iniciais e obter os resultados.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho do GNSS-R na determinação da umidade do solo no entorno de uma estação, promovendo ainda o conhecimento técnico científico acerca deste, visando a proposição de um método alternativo para esta finalidade.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Investigar o comportamento e qualidade das reflexões na estação de estudo através do SNR, considerando cada satélite e sinal observado.
- b) Determinar os parâmetros refletométricos (Amplitude, Fase e Frequência) a partir das séries temporais simuladas e rastreadas por meio do algoritmo de refletometria.
- c) Avaliar os resultados da umidade do solo por GNSS-MR por meio da comparação com os valores advindos das sondas.
- d) Analisar a correspondência dos resultados obtidos frente aos eventos de precipitação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

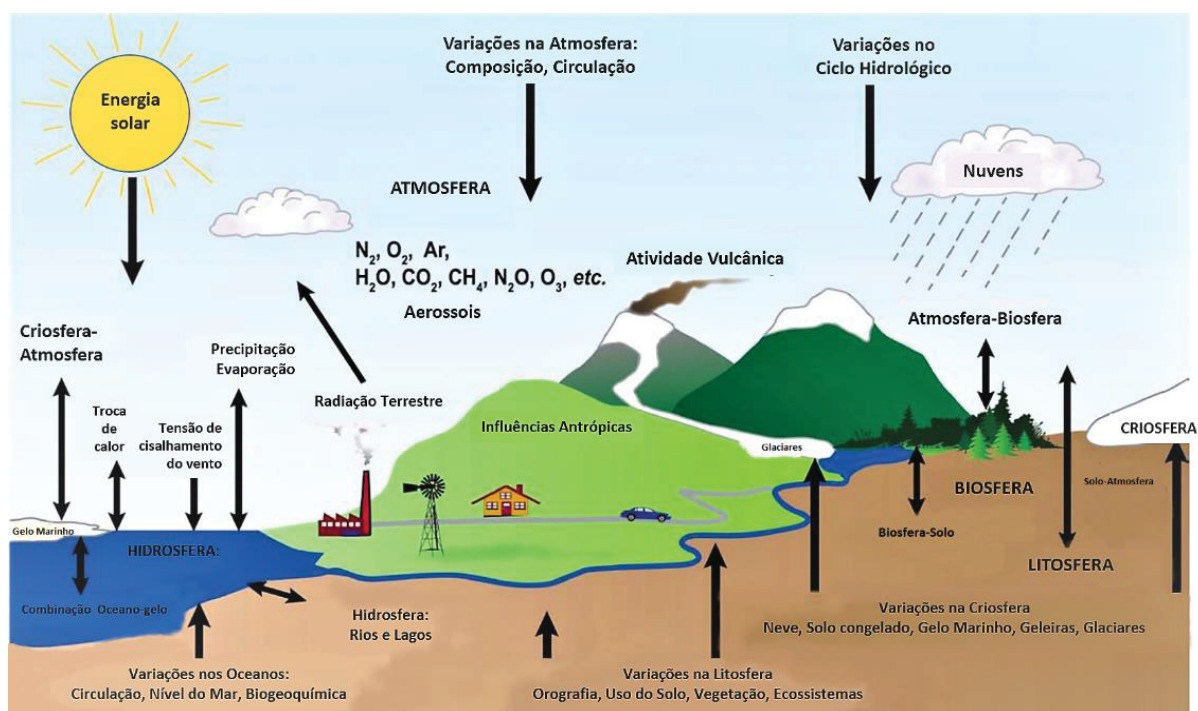
Nesta Seção são abordados os principais temas relacionados a esta pesquisa.

2.1 UMIDADE DO SOLO

A importância da umidade do solo e sua quantificação se dá em diferentes níveis de abrangência, que podem variar desde o controle da umidade no jardim de uma residência até a determinação de dados para implementação de modelos do sistema climático global.

Na FIGURA 1 são apresentados os principais elementos que compõem o este sistema. A água armazenada no solo compõe o ciclo hidrológico, bem como, é agente fundamental nos fluxos de energia envolvendo a Hidrosfera, Atmosfera, Litosfera, Criosfera e também a Biosfera. Conforme abordado por Seneviratne et al. (2010), a extrema complexidade destes processos é evidenciada quando se considera a heterogeneidade de cobertura do solo e sua variação temporal.

FIGURA 1 – SISTEMA CLIMÁTICO GLOBAL

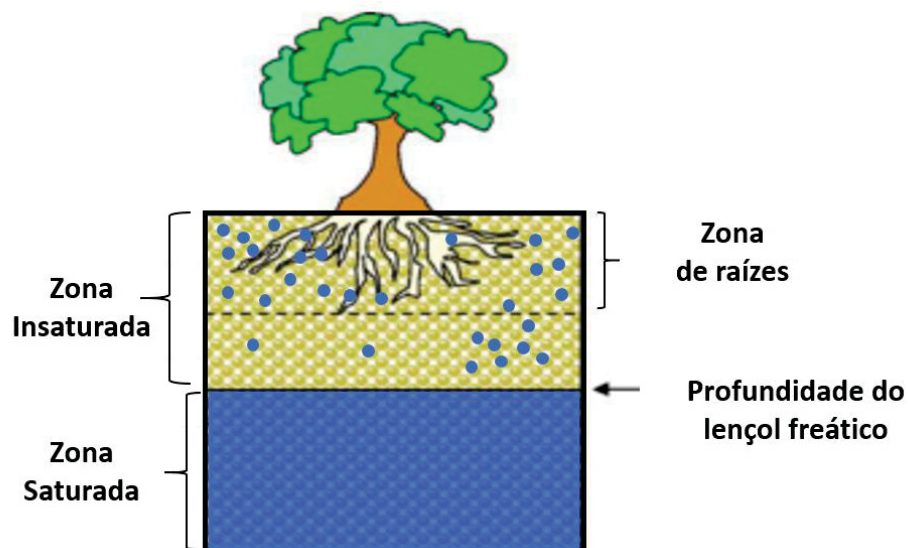


FONTE: Adaptado de Seneviratne et al. (2010).

Tradicionalmente o conteúdo volumétrico de água no solo é determinado através de sondas instaladas *in situ* ou por meio de análises efetuadas a partir de amostras do solo coletadas na área de interesse. Contudo, este volume de água no solo não é distribuído espacialmente de maneira homogênea, nem horizontalmente ao longo da área considerada, nem verticalmente, em profundidade. Com isto, para se monitorar uma área, em muitos casos, faz-se necessário a utilização de diversas sondas instaladas ou amostras extraídas.

Na FIGURA 2, destaca-se a Zona Insaturada ou Zona Vadosa, na qual está compreendida a Zona de raízes da vegetação. É nesta porção que a umidade do solo é caracterizada. Os círculos azuis representam a distribuição não uniforme da umidade ao longo da zona vadosa.

FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE NO SOLO



FONTE: Adaptado de Seneviratne et al. (2010).

A quantificação desta grandeza é dada pela razão do volume de água (V_A) em relação a um dado volume de solo (V_S). Assim, de acordo com Seneviratne et al. (2010), o conteúdo volumétrico de água no solo (US_V) é dado pela EQUAÇÃO 1:

$$US_V = \frac{V_A}{V_S} \quad (1)$$

A unidade desta razão, em geral, é dada em m^3/m^3 podendo ser apresentada também em porcentagem ($\%/ \text{m}^3$).

2.1.1 Determinação da umidade do solo

Existem diversos métodos para efetuar determinações da umidade do solo de maneira direta ou indireta, destacam-se: Gravimétrico; das Pesagens; do Tensiômetro; do Acetileno; Nêutrons; Reflectometria² no Domínio do Tempo; Reflectometria no Domínio da Frequência; Acústico; Blocos de Resistência; e Método Térmico (MENDES, 2006). Na literatura pode-se encontrar diferentes nomenclaturas para estes métodos, dadas de acordo com diferentes autores.

2.1.1.1 Método Gravimétrico

No método gravimétrico, que é um método direto, efetua-se a coleta de uma amostra do solo. Em laboratório é medida a massa desta amostra que em seguida é submetida a uma fonte de calor (estufa, forno, entre outras) para extração da água. Após o processo de evaporação, mede-se novamente a massa da amostra e a umidade é quantificada através da diferença de massa entre a amostra úmida e seca. De acordo com Mendes (2006), este método é também chamado de método da estufa, o qual possibilita determinações acuradas, sendo utilizado em muitos casos para calibrar os equipamentos empregados nos métodos indiretos.

2.1.1.2 Método da Reflectometria no Domínio da Frequência

Os métodos indiretos utilizam instrumentos que medem propriedades específicas do solo e as convertem em umidade, em geral, por meio de um ajuste linear ou função polinomial. Seneviratne et al. (2010), indicam que as duas técnicas indiretas mais comuns são a TDR (*Time Domain Reflectometry*) e a FDR (*Frequency Domain Reflectometry*). Estas duas técnicas exploram a permissividade do solo que tem relação direta com o teor de umidade.

² Cabe ressaltar a relação de Paronímia entre este e o método de estudo desta pesquisa. (Repletometria GNSS por Multicaminho).

Nas sondas TDR se determina a permissividade elétrica do solo em função da medida do tempo de propagação de um pulso eletromagnético, ao passo que nas FDR, ou sondas de capacitância, a permissividade do solo é determinada em função da medida da frequência de um pulso eletromagnético.

Estes equipamentos proporcionam soluções rápidas e autônomas, permitindo o amplo registro de dados, por exemplo, minuto a minuto. Por efetuarem determinações de maneira indireta, requerem uma calibração inicial que considere as características físicas locais permitindo definir uma relação matemática entre as grandezas medidas e a umidade do solo, tais como a composição do solo.

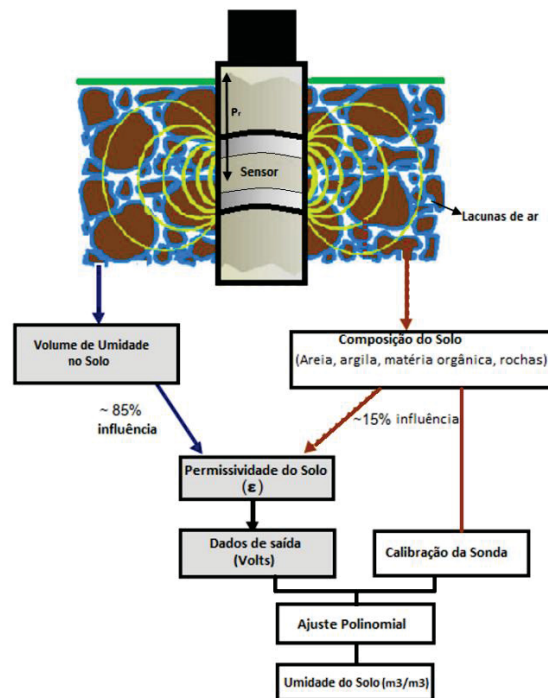
As sondas FDR têm menor custo que as sondas TDR, desta forma são amplamente empregadas. De acordo com Souza et al. (2013), uma sonda FDR emprega capacitores para determinação da umidade do solo, os quais consistem em sensores caracterizados por um par de eletrodos ou placas metálicas condutoras separadas por um material isolante. A capacitância aumenta em função do aumento de moléculas de água no solo e com os dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor através do meio dielétrico proveniente da matriz água-solo.

Na FIGURA 3, um esquema sobre o funcionamento de uma sonda FDR é apresentado. O sensor (capacitor) é delimitado por dois anéis metálicos paralelos que registram a relação campo elétrico-dipolos. Em função do conteúdo volumétrico de água e da composição do solo determina-se a permissividade e, com isto, a diferença de potencial elétrico ou tensão, dada em Volts (V), que são os dados de saída da sonda.

Os dados resultantes são alusivos a uma profundidade de referência (P_r), dada em função da distância entre a posição do sensor e o topo da sonda. A conversão da Tensão (V) em umidade do solo pode ser efetuada automaticamente através de um *Data Logger*. Isto é efetuado através de um ajuste polinomial, ou linear em determinados casos, considerando a calibração da sonda.

A composição do solo é um fator fundamental em se tratando deste tipo de equipamento, pois tem relação direta com a permissividade. Os fabricantes fornecem valores médios que podem ser usados para efetivar a conversão dos dados de saída (V) em umidade do solo, diferenciando, por exemplo, solos mineralizados ou solos ricos em matéria orgânica. Contudo, deve-se considerar que estes são valores genéricos.

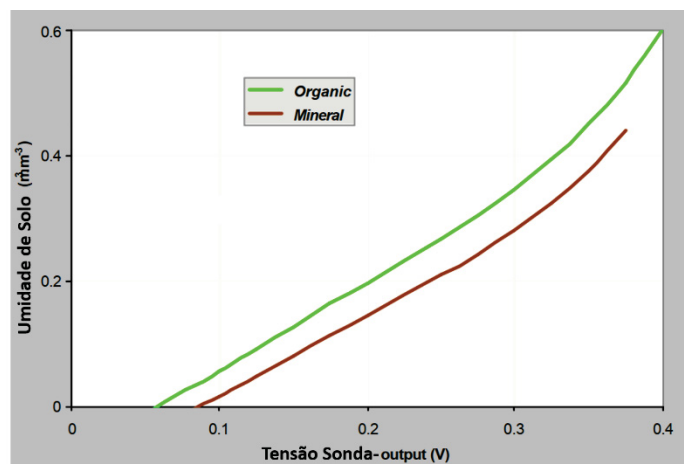
FIGURA 3 – SONDA FDR (CAPACITÂNCIA)



FONTE: Adaptado de Delta-T Devices Ltd (2001).

A FIGURA 4 indica a relação de correspondência entre a tensão resultante da sonda (V) e a umidade do solo (m^3/m^3) para uma dada sonda de capacitância. Verifica-se a diferença obtida entre um tipo de solo em que predomina a matéria orgânica (linha verde) e em outro composto predominantemente por minerais (linha marrom).

FIGURA 4 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE TENSÃO E UMIDADE



FONTE: Adaptado de Delta-T Devices Ltd (2001).

Fatores como a salinidade, presença de óxidos de ferro, temperatura, bem como o material que compõe o solo devem ser considerados quando se almeja dados mais acurados. Neste âmbito, deve-se considerar também o rigor nos procedimentos de instalação da sonda a fim de evitar: lacunas de ar, já que estas alteram o campo elétrico criado pelo capacitor; proximidade a rochas; fixação da sonda em posição diferente daquela recomendada.

2.1.1.3 Método das Sondas de Nêutrons de Raios Cósmicos

A moderação da intensidade de nêutrons rápidos frente a presença de átomos de hidrogênio é uma propriedade que pode ser adotada para determinação da umidade do solo. Segundo Zreda et al. (2012), a intensidade da dispersão destes nêutrons é reduzida em função da interação com átomos de hidrogênio, principalmente presentes na água retida no solo. Logo, quanto maior for o conteúdo de água, maior será a redução desta intensidade.

Existem dois tipos de equipamentos que se baseiam neste princípio: os ativos, que emitem radiação própria para dar origem aos nêutrons rápidos, principalmente de Amerício e Berilo, conforme exposto por Pereira (2001); e os passivos, que utilizam nêutrons provenientes de fontes externas, dentre as quais as fontes espaciais que dão origem aos raios cósmicos galácticos.

Conforme Lago (2007), os raios cósmicos são partículas que atingem a Terra com energias que vão de 109 Elétron-Volt³ (eV) a 1020 eV. Estes raios são provenientes do meio interestelar e foram descobertos em 1912 por Victor Hess, o qual por este motivo, ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1936.

Rivera Villarreyes (2013), indica que, quando estes raios cósmicos galácticos penetram a atmosfera e interagem com suas partículas composicionais, dão origem a uma cascata de nêutrons (FIGURA 5) com alta energia que continuam a se propagar até atingir a superfície física da Terra. Desta nova interação surge uma segunda cascata dando origem aos nêutrons rápidos. Parte destes nêutrons é absorvida pelo hidrogênio contido na água que caracteriza a umidade do solo, a parte remanescente

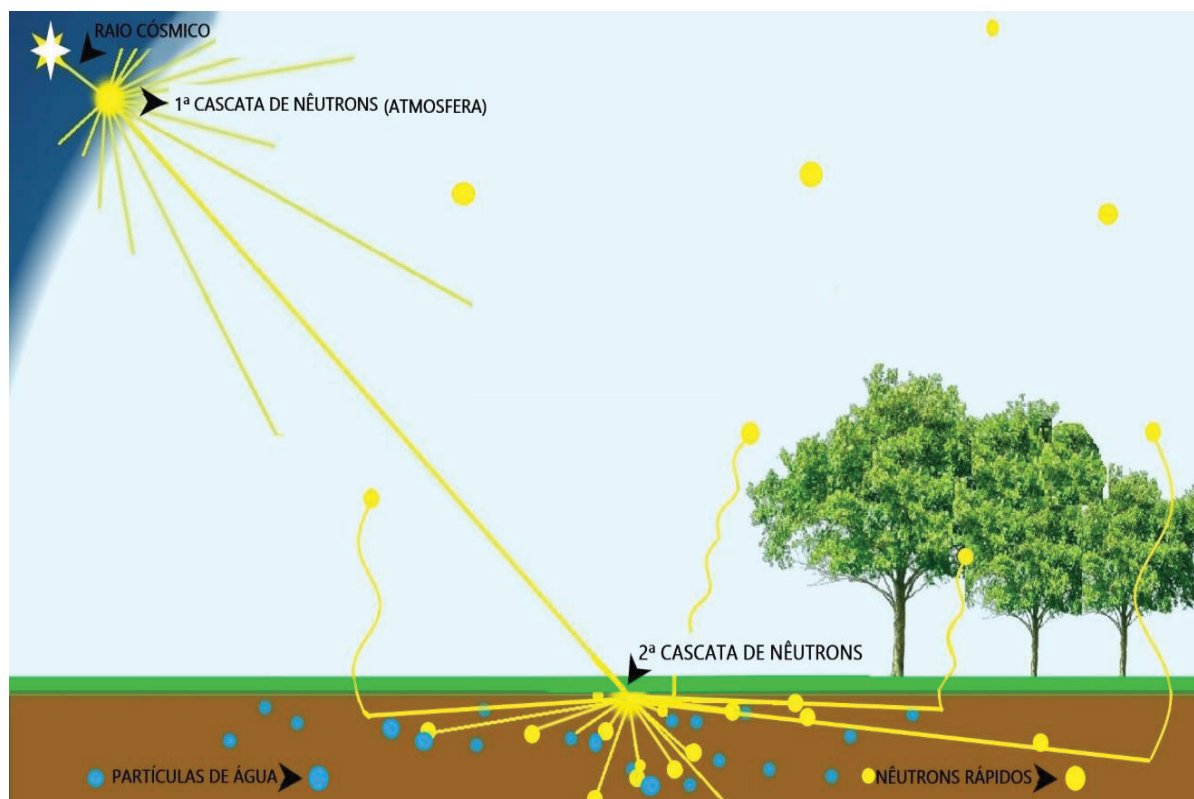
³ Elétron-volt é uma unidade de medida de energia e corresponde a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo.

retorna a atmosfera. Portanto, este fluxo de retorno é inversamente proporcional ao conteúdo de umidade do solo.

Os equipamentos que exploram estas propriedades são ditos sondas de nêutrons de raios cósmicos, por exemplo, as sondas da rede *Cosmic-Rays Neutrons Probes* – COSMOS (*COsmic-ray Soil Moisture Observing System*). O princípio de funcionamento deste equipamento é baseado na avaliação da moderação da intensidade de nêutrons rápidos e nêutrons térmicos provenientes de raios cósmicos. Para isto, mede-se a variação da alta energia destes nêutrons através do monitoramento da energia incidente e da energia de retorno à atmosfera após interação com o solo.

As características do local, bem como, a composição do solo são consideradas através de um processo de calibração visando a determinação do relacionamento entre a intensidade dos neutros rápidos após interação com o solo e a umidade do solo (*US*).

FIGURA 5 – RAIOS CÓSMICOS E CASCATA



FONTE: O autor (2019).

Em conformidade com Desilets et al. (2010), US pode ser inferida conforme a EQUAÇÃO 2:

$$US = \frac{a_0}{\left(\frac{N}{N_0}\right) - a_1} - a_2 \quad (2)$$

A variável N refere-se a taxa de contagem de nêutrons rápidos. Esta taxa é normalizada para variações na pressão, vapor de água atmosférico e atividade solar. N_0 é a intensidade de nêutrons após interação com o solo; e, a_0 , a_1 , a_2 são os coeficientes de ajuste da calibração.

Estas sondas proporcionam resultados de maneira autônoma sobre uma extensão que depende das características locais, mas que em geral é de centenas de metros. Além disso, por explorarem uma fonte natural, abrem vantagem sobre as sondas de nêutrons ativas, pois não expõem o meio a radiação. Outrossim, proporcionam medidas mais acuradas que as sondas que exploram a permissividade do solo.

Como desvantagens é necessário considerar o custo elevado destes equipamentos e também que, embora a moderação de nêutrons ocorra principalmente pela água do solo, outros elementos tais como vegetação e cursos de água, por exemplo, podem eventualmente afetar os resultados.

2.2 GNSS

Na década de 60 com o lançamento do primeiro satélite artificial, o SPUTNIK-1, teve início a chamada Era Espacial. A partir deste lançamento surge a concepção de navegação utilizando sinais de rádio enviados por satélites. Com isto, foram surgindo sistemas de posicionamento por satélite visando originalmente à determinação de Posição, Navegação e Sincronização – PNT (do inglês *Positioning, Navigation and Timing*) e, segundo Seeber (2003), tendo a vantagem de serem sistemas globais e independentes de condições climáticas. Estes sistemas foram desenvolvidos inicialmente para fins militares, contudo, passaram a ser adotados também para as mais diversas aplicações de uso civil e são hoje comumente utilizados, por exemplo, por qualquer pessoa que possua um smartphone.

Entretanto, conforme Krueger (2006), apenas em 1991 vem a ser criado o termo GNSS (*Global Navigation Satellite System*) durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea, quando o ICAO (*International Civil Aviation Organization*) reconheceu que os sistemas de navegação do século XXI proporcionariam sistemas globais de navegação.

O GNSS engloba os diversos Sistemas de Posicionamento, como os sistemas globais: NAVSTAR-GPS, comumente chamado de GPS, estadunidense, e o GLONASS, russo, que surgiram na década de 70 e são, atualmente, os principais sistemas GNSS, assim como o Galileo, europeu, e o COMPASS-BeiDou, chinês. Também compõem o GNSS os sistemas regionais: IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*), indiano, e o japonês QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*). Estes sistemas são compostos por três segmentos: Espacial, de Controle, e de Usuário.

O segmento Espacial é composto pela constelação de satélites distribuídos em planos orbitais de forma a garantir cobertura global com visibilidade de no mínimo 4 satélites em qualquer local e horário, para o caso dos sistemas globais. No caso dos SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*) ou Sistemas de Aumentado Baseados em Satélites, como o IRNSS e o QZSS, este segmento tem características específicas pois contam com uma cobertura regional por meio de satélites geoestacionários.

O segmento de Controle é responsável pelo monitoramento e controle contínuo dos satélites, determinação do sistema de tempo do respectivo sistema, predição e definição de efemérides, correções dos relógios dos satélites e atualização sistemática das mensagens de navegação. Para isto, este segmento conta com diversas estações *in situ* distribuídas ao longo do globo terrestre.

Por fim, o segmento Usuário corresponde ao conjunto de usuários, civis e militares, no qual estão inseridas também as organizações mantenedoras de redes GNSS.

Segundo Krueger (2006), a grandeza fundamental nestes sistemas é a medida do tempo decorrido entre a emissão do sinal pela antena de, no mínimo, quatro satélites, e as respectivas recepções destes sinais na antena do receptor.

Os sinais enviados continuamente pelos satélites são ondas eletromagnéticas do tipo micro-ondas da banda L, que corresponde à faixa de frequência de 1,2 à 1,6 GHz propagados com a velocidade da luz no vácuo (TEUNISSEN E MONTENBRUCK, 2017). Logo, a partir do conhecimento do tempo de propagação do

sinal, pode-se determinar a distância geométrica entre as antenas do satélite e do receptor, a qual, devido à influência de erros ligados à propagação do sinal e também da não sincronização entre os relógios dos satélites e dos receptores, é chamada de pseudodistância. Para cada uma das medidas das pseudodistâncias o modelo matemático conterá quatro incógnitas, sendo estas as coordenadas tridimensionais da antena receptora sobre a superfície terrestre e o tempo.

Neste contexto, o posicionamento através do GNSS pode ser feito por duas maneiras, pela medida do código ou da fase da onda portadora. Conforme Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001), para o primeiro caso efetuam-se as medidas a partir da diferença do código proveniente do satélite e a réplica deste código que é gerada no receptor, em relação a um instante de tempo (t). Como a propagação ocorre à velocidade de 299.792.458 m/s, esta diferença de tempo entre os códigos requer precisões de frações de segundos. Por este motivo, as medidas efetuadas por meio da fase são mais precisas, visto que, neste caso, as determinações são baseadas no número de ciclos inteiros contidos na onda portadora.

Os códigos são sinais binários modulados pelas ondas portadoras e são pseudoaleatórios (*Pseudo Random Noise - PRN*). Cada satélite é identificado por meio de um código PRN específico, dentre 37 possíveis. (MONICO, 2008)

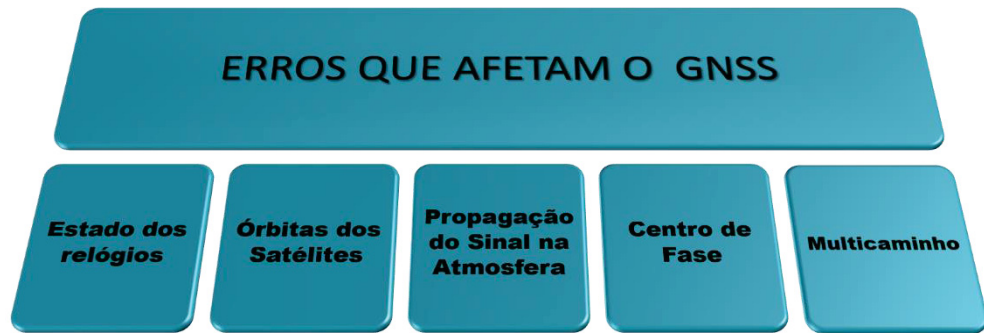
Por meio da fase determina-se a diferença entre a fase da onda portadora recebida do satélite, e a fase da réplica deste sinal gerada no próprio receptor, ambas no instante de recepção t . Com isto, a observável é ambígua em um número inteiro de comprimento de ondas.

Segundo Monico (2008), as ambiguidades são estimadas por ajustamento. Nesta fase a solução das ambiguidades ocorre em duas etapas, sendo a primeira dita flutuante, onde ocorre a estimação de valores não inteiros de ciclos. Na segunda etapa ocorre um novo ajustamento determinando-se o número inteiro de ciclos e definindo-se a parte fracionária restante, a qual tem precisão de até 1/1000 do ciclo.

Diversos são os erros que atuam nestes sistemas, os quais são inerentes aos satélites, à propagação do sinal, aos receptores e antenas. A FIGURA 6 indica as principais fontes de erros no posicionamento GNSS.

A depender da aplicação almejada do posicionamento, este conjunto de erros deve ser eliminado, ou minimizado, mesmo que parcialmente, por meio de técnicas e procedimentos específicos.

FIGURA 6 – FONTES DE ERROS



FONTE: O autor (2018)

A equação das pseudodistâncias por meio da medida da fase da onda portadora para um instante (t) é descrita pela EQUAÇÃO 3, de acordo com Seeber (2003):

$$PD_{\Phi} = D + cdt_u + cdt_{trop} + cdt_{ion} + cdt_s + c \frac{N}{f_{\Phi}} + \varepsilon_D \quad (3)$$

Em que PD_{Φ} é a pseudodistância por meio da medida de fase da onda portadora; D , distância geométrica entre a antena do receptor e a antena do satélite; c , velocidade de propagação da luz no vácuo; dt_u , erro de sincronismo entre o relógio do receptor e o tempo GPS; dt_{trop} , influência na propagação do sinal devido a troposfera; dt_{ion} , influência na propagação do sinal devido a ionosfera; dt_s , erro de sincronismo entre o relógio do satélite e o relógio do receptor GPS; f_{Φ} , frequência da onda portadora; N , ambiguidade; ε_D , demais erros (órbita dos satélites, efeito do multicaminho, ruído do receptor, variação do centro de fase da antena, etc.)

Na pseudodistância determinada pelo código todos estes termos estão presentes na equação, com exceção do termo das ambiguidades, visto que este sinal não é ambíguo.

Apesar do GNSS, ter sido desenvolvido visando primordialmente o posicionamento, atualmente ele pode ser também empregado para outras finalidades, conforme exposto por Zhang et al. (2017), como é o caso da Refletometria GNSS, na

qual o efeito de sinais indiretos nas observáveis GNSS, que dá origem a erros no posicionamento, é essencial.

2.2.1 CONSTELAÇÕES E OBSERVÁVEIS

Aqui são destacadas duas das constelações GNSS, GPS e GLONASS, assim como as observáveis inerentes a estes sistemas, as quais envolvem as ondas portadoras, códigos, mensagens de navegação e o SNR.

O sistema NAVSTAR-GPS, comumente chamado GPS, é o sistema mais conhecido mundialmente. Ele foi declarado operacional no ano de 1994, contendo 24 satélites na órbita terrestre distribuídos em 6 planos orbitais com 55° de inclinação em relação ao plano do equador, conforme definido para a constelação básica. Estes satélites orbitam a uma altura de aproximadamente 20.200 km, com período orbital de 12h siderais, o que garante a cobertura global (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER, e COLLINS, 2001). Atualmente este sistema conta com 31 satélites operacionais em órbita (TEUNISSEN E MONTENBRUCK, 2017).

A bordo dos satélites GPS, os osciladores de Césio e Rubídio geram simultaneamente, a partir de uma frequência fundamental de 10,23 MHz (MegaHertz), as ondas portadoras L1 e L2. De acordo com Monico (2008), esta frequência fundamental é multiplicada pelos coeficientes: 154 para a L1 e 120 para a L2. Com o início da operação de atualização dos satélites deste sistema pelo Bloco IIF, passou-se a contar com uma terceira frequência, a portadora L5, cujo coeficiente adotado é 115.

Todos os satélites deste GPS transmitem na mesma frequência e são identificados pelo seu código PRN através da técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*). Os códigos C/A e o P são exemplos de códigos PRN (JIN, CARDELLACH e XIE, 2014). Estes códigos são modulados em fase nas ondas portadoras.

A portadora L1 tem frequência de 1.575,42 MHz e um comprimento de onda (λ) de aproximadamente 19,05 cm. A onda portadora L2 tem frequência de 1.227,60 MHz, e $\lambda = 24,45$ cm.

Por sua vez, a L5 apresenta frequência de 1.176,45 MHz e $\lambda = 25,48$ cm. Este sinal é de extrema importância tendo em vista a sua compatibilidade e interoperabilidade entre os diferentes sistemas de navegação por satélites (TABIBI et

al., 2015). Além disto, por ter uma banda protegida, é um sinal de grande importância para a aviação. De acordo com a UNAVCO (2018), 12 transmitem o sinal L5 atualmente.

O código C/A (*Coarse Acquisition*) tem frequência de 1,023 MHz, com comprimento de onda de aproximadamente 300m, e é modulado pela portadora L1. De acordo com Leick (1995), este código faz parte de uma família de códigos ditos *Golden Codes*, os quais tem por características ter baixa correlação entre os demais códigos da mesma família, com isto, os sinais recebidos simultaneamente podem ser rapidamente identificados.

O P (*Precise*), é reservado para fins militares e é transmitido com frequência de 10,23 MHz. Devido a frequência deste sinal ser maior, as medidas provenientes deste sinal são mais precisas que do código C/A. Este sinal é modulado também pela portadora L2. Apesar deste código ser mais preciso, ele é criptografado (P(Y)).

As Mensagens de navegação também são moduladas sobre as portadoras e contêm informações como parâmetros orbitais, almanaques, dados de correções dada a propagação na atmosfera, parâmetros para a correção do erro de sincronismo dos relógios dos satélites, e saúde dos satélites.

Destaca-se que o primeiro satélite do Bloco III, recentemente lançado, conta com um novo sinal civil (L1C) modulado na onda portadora L1, que não deve ser confundido com o C/A – L1. Este novo sinal será compatível com outros sistemas de navegação por satélites. Os demais satélites deste bloco deverão ser lançados futuramente (GPS.GOV - EUA, 2018).

O sinal L2C é também um código civil, é modulado pela L2 e tornou-se disponível aos usuários a partir de 2005 com o lançamento de alguns satélites do Bloco IIR-M. De acordo com Zhang et al. (2018), este sinal é mais potente que o código C/A, e é composto pela combinação de dois códigos: M, de comprimento Moderado e L, de Comprimento Longo (UNAVCO, 2015). Atualmente, 19 satélites GPS transmitem o código L2C, ainda de acordo com a UNAVCO (2018).

O GLONASS é um sistema russo que teve origem na extinta União Soviética (MONICO, 2008), e é controlado pela Roskosmos – Agência Espacial da Federação Russa. De acordo com Teunissen e Montenbruck (2017), este sistema foi considerado operacional em 1995, contudo, limitação da vida útil dos primeiros satélites e a falta de reposição dos mesmos, o número de satélites operacionais decresceu gradativamente. Com a retomada do sistema, a partir de 2011 ele foi considerado

operacional novamente. Teunissen e Montenbruck (2017) indicam que este sistema conta com dois serviços: Serviço Padrão, que é de livre acesso aos usuários; e um Serviço restrito.

De acordo com o Centro de Informação e Análises Russo (2019), o sistema conta atualmente com 26 satélites em órbita, sendo 24 operacionais. Segundo Monico (2008), os satélites deste sistema estão distribuídos em 3 planos orbitais, com inclinação de $64,8^\circ$ em relação ao plano do equador e separados entre si em 120° em longitude. Os satélites orbitam a uma altitude de aproximadamente 19.100,0 km em um período orbital de 11h 15 min.

A estrutura do sinal definida originalmente para o sistema GLONASS era diferente do sistema GPS, pois utiliza a FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), desta forma, cada satélite enviava uma frequência própria. Com a atual modernização a partir do lançamento do primeiro satélite do grupo GLONASS-K, um novo sinal L3 tem sido transmitido. Os satélites GLONASS-K serão a nova geração de satélites que irão transmitir 5 sinais de navegação nas bandas L1, L2 e L3, incluindo a transmissão CDMA, e irão gradualmente substituir os satélites do GLONASS-M.

De acordo com Löfgren (2014), este sistema conta com a onda portadora L1, que neste caso tem frequência média de 1602,0 MHz e $\lambda = 18,71$ cm e onda portadora L2 com frequência média de 1246,0 MHz e $\lambda = 24,06$ cm.

Conforme Teunissen e Montenbruck (2017), os códigos FDMA são modulados pelas portadoras L1 e L2, e em analogia ao GPS, são chamados C/A para o modulado na onda portadora L1 tendo frequência de 0,511 MHz, e código P, que de igual forma é modulado pela L1 e L2 com frequência 5,11 MHz, conforme Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, e Collins, (2001), contudo, estas denominações não são oficiais.

2.2.1.1 SNR

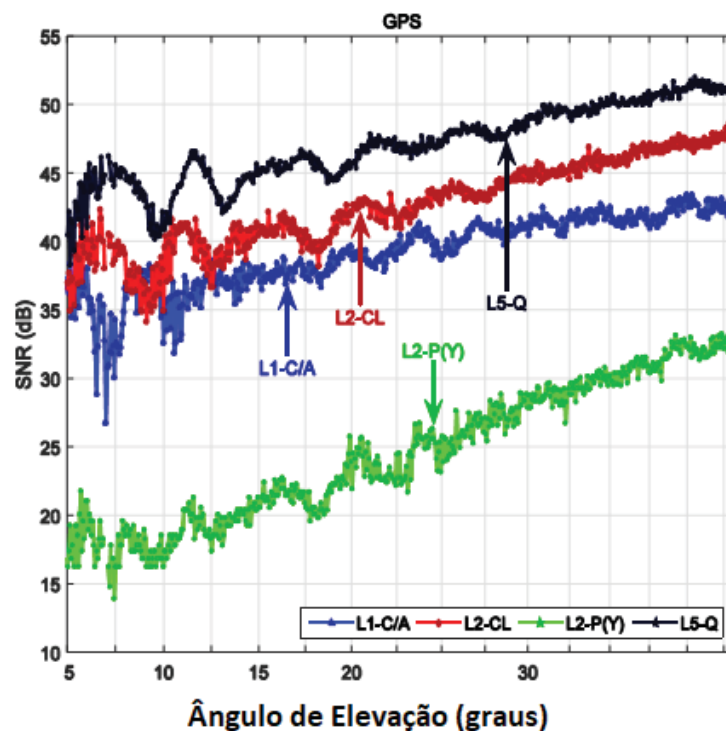
De acordo com Larson et al. (2010), o SNR é uma observável GNSS continuamente registrada pelos receptores que consiste na razão entre a potência do sinal recebido e o ruído do sinal, sendo geralmente expresso usando um logaritmo decibel (dB), ou decibel-Hertz (dB-Hz).

Para muitos receptores GNSS, o SNR é uma medida direta, registrada ao longo do rastreamento do satélite, dado pela potência ou amplitude da onda portadora normalizado por um fator de ruído, conforme Bilich e Larson (2007).

Esta observável está sujeita a interferências provenientes do efeito de multicaminho, deste modo, pode ser adotada como método alternativo para se analisar a qualidade dos sinais quanto a influência deste fenômeno. O acesso ao SNR pode ser efetuado por diferentes maneiras: 1) RINEX. Arquivo de rastreo no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) o qual possui diferentes tipos de SNR de acordo com a versão do RINEX; 2) Softwares de processamento e de análise de dados. Sejam eles comerciais ou científicos, possibilitam acessar o SNR. Dentre estes cita-se o TEQC desenvolvido pela *University Navstar Consortium (UNAVCO)* e o RTKlib desenvolvido pela *Tokyo University of Marine Science and Technology*. 3) Sentença NMEA (*National Marine Electronics Association*) 0183, a qual se caracteriza como uma especificação relacionada a padronização de dados em um formato padrão para a comunicação entre equipamentos eletrônicos para transmissão de dados relativos ao posicionamento, através da mensagem \$GPGSV (*GPS Satellites in View*).

Na FIGURA 7 são apresentadas observações SNR para um arco ascendente de um satélite da constelação GPS. Percebe-se a diferença no comportamento do SNR em função do tipo de sinal GNSS.

FIGURA 7 – OBSERVÁVEIS SNR POR DIFERENTES SINAIS



FONTE: Adaptado de Tabibi et al. (2017).

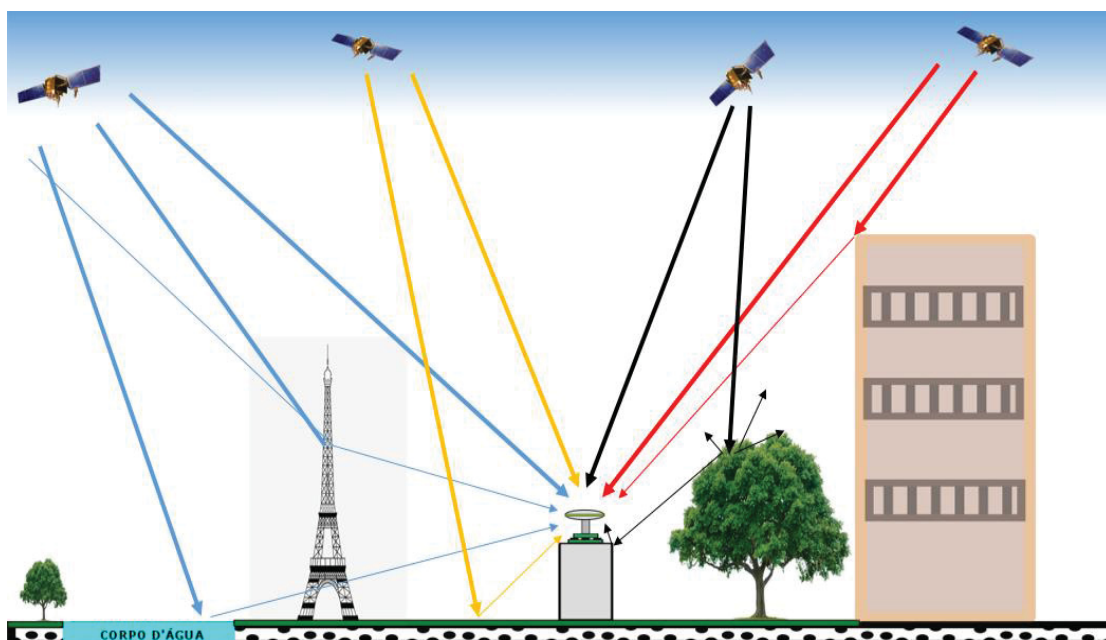
2.3 REFLEXÃO E MULTICAMINHO

Uma das principais fontes de erros no âmbito do GNSS é o efeito do multicaminho (FIGURA 8). Segundo Seeber (2003), ele é um fenômeno pelo qual os sinais emitidos pelos satélites chegam à antena receptora de maneira indireta via múltiplos caminhos, atribuídos à reflexão dos sinais nas superfícies situadas no entorno da antena GNSS.

Devido a recepção destes sinais adicionais, que chegam a antena com um atraso de tempo, ocorre a adição de observações com intervalos de tempo de propagação maiores, o que acarreta na introdução de erros no cálculo das pseudodistâncias e também de fase, degradando as soluções do posicionamento e as demais observáveis (TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017). Desta forma o multicaminho pode ser visto como a recepção conjunta de sinais diretos e indiretos (refletidos).

De acordo com Löfgren (2014), a interferência do multicaminho é criada devido a diferença de fase no receptor entre o sinal direto e o indireto. A diferença muda em função da movimentação do satélite em sua órbita, criando uma interferência padrão. Esta interferência é especialmente vista no SNR. Na FIGURA 8 a reflexão dos sinais GNSS é indicada.

FIGURA 8 – MULTICAMINHO



FONTE: O autor (2019).

A magnitude dos erros no posicionamento causados por este efeito é função da observável considerada, das dimensões das obstruções presentes na área de levantamento, assim como da natureza física do meio que a compõe.

Por conseguinte, em posicionamentos geodésicos é fundamental que estes sinais sejam minimizados uma vez que os efeitos do multicaminho podem gerar, segundo Braasch (1996) *apud* Bilich e Larson (2007), erros na ordem de centímetros para as observações de fase da onda portadora e de vários metros nas observações de código.

Diante da busca por precisão e acurácia no posicionamento GNSS, muitas são as pesquisas continuamente realizadas em busca de técnicas e materiais que auxiliem na redução deste efeito.

Em primeira instância, deve-se considerar, desde que possível, a escolha de um local que não esteja muito próximo de obstruções, visto que estas, além de causarem possíveis bloqueios na recepção dos sinais diretos, podem se comportar como superfícies refletoras.

De acordo com as características das superfícies, a reflexão pode ocorrer de três formas: difração, especular (reflexão coerente) e difusa (reflexão incoerente) (ROUSSEL, 2015). Nievinski e Mônico (2006), definem que as observações ditas coerentes, mantêm uma relação estável na fase da portadora entre o sinal direto e o sinal refletido. Em contraste, observações incoerentes têm fase aleatória.

A especular é a que mais contribui para o multicaminho, não se descartando a contribuição da reflexão difusa, a qual está diretamente relacionada à rugosidade das superfícies. Superfícies como corpos d'água e superfícies metálicas, podem ser consideradas especulares, desta forma, levantamentos realizados nas proximidades destes meios são propensos à ocorrência de multicaminho.

Atualmente grande parte dos modelos de antenas geodésicas vem equipadas com um disco interno destinado a reduzir a recepção de sinais pelo hemisfério inferior, por onde predominantemente chegam os sinais indiretos. No contexto de antenas GNSS, Huinca (2009) indica que as do tipo *Choke Ring* possuem depressões e anéis concêntricos que atenuam parte dos sinais indiretos, principalmente para reflexões originadas por satélites com altos ângulos de elevação.

Outro exemplo são materiais atenuadores de radiação eletromagnética que são fixados sob as antenas, protegendo o hemisfério inferior das antenas GNSS, dentre os quais o protótipo isolante eletromagnético, AEM (*Attenuator of the Multipath*

Effect) desenvolvido no LAGEH/UFPR. Este protótipo foi projetado, com base na tecnologia militar *Stealth*, termo em inglês para escondido ou furtivo, sendo ela empregada em aviões, submarinos e helicópteros de combate, tornando-os invisíveis aos radares e sonares. Consiste em um material que tem a propriedade de refletir ou absorver ondas eletromagnéticas convertendo-as em calor.

A modelagem do multicaminho é muito complexa, visto que, afeta todas as observáveis e a sua magnitude varia em função das propriedades da superfície refletora, dos azimutes de passagem dos satélites e seus respectivos ângulos de elevação, como também, da frequência do sinal. Por conseguinte, o que se buscaria modelar é o resíduo da Dupla Diferença de Fase após modelados os erros das órbitas, do não sincronismo de relógios e de atrasos na atmosfera.

De acordo com Larson et al. (2010), as fases das ondas portadoras de todos os satélites visíveis durante o rastreamento são avaliadas simultaneamente no ajustamento, o que implica na propagação de resíduos para todos os sinais, dificultando a distinção entre eles, tornando ainda mais complexa a modelização do multicaminho visando melhoria no posicionamento.

2.3.1 Polarização do sinal

Os sinais enviados pelos satélites são ondas eletromagnéticas, as quais são compostas por um campo elétrico e por um campo magnético, perpendiculares entre si e ambos perpendiculares à direção de propagação da onda. A polarização destas ondas é definida pela maneira como os campos elétrico e magnético se propagam, sendo geralmente utilizado o campo elétrico para descrever a propagação.

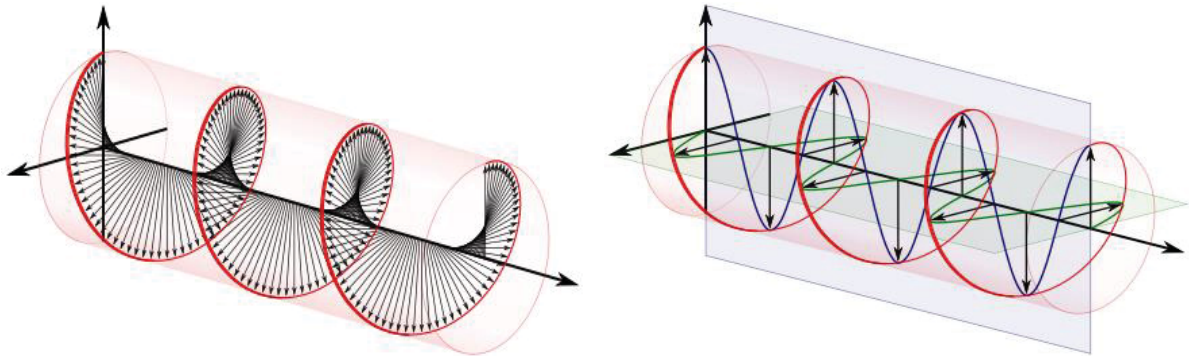
Segundo Katzberg et al. (2006), os sinais transmitidos pelos sistemas GNSS tem polarização do tipo RHCP (*Right – Hand Circularly Polarised*), Polarização Circular à Direita, FIGURA 9.

Ao refletirem nas superfícies estes sinais podem sofrer uma inversão no sentido da polarização passando a ter Polarização Circular à Esquerda - LHCP (*Left – Hand Circularly Polarised*), indicada na FIGURA 10. Esta inversão depende da direção incidência do sinal e das propriedades dielétricas da superfície refletora.

Através da FIGURA 11 destaca-se uma antena GNSS em posição convencional do posicionamento GNSS, com o *boresight* voltado ao Zênite. Evidencia-

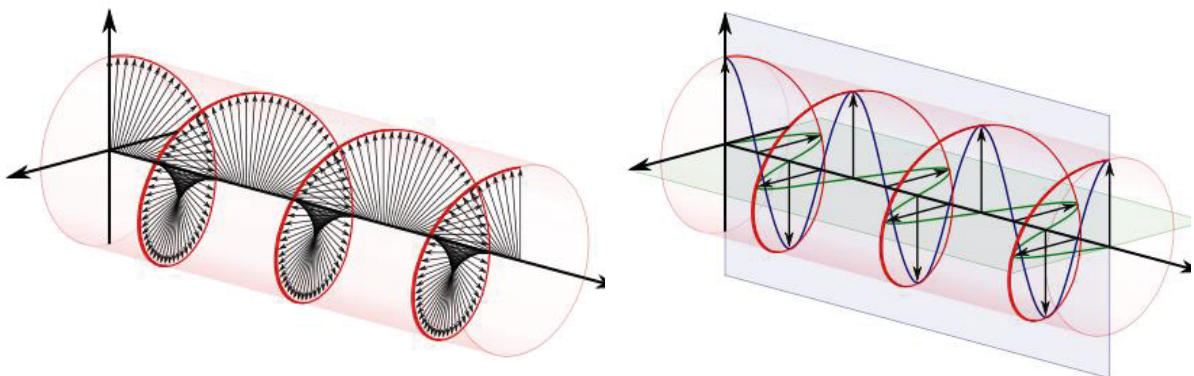
se que não ocorre necessariamente a inversão da polarização dos sinais após reflexão. Estes sinais refletidos podem ter polarização LHCP ou RHCP.

FIGURA 9 – POLARIZAÇÃO RHCP



FONTE: Adaptado de Robb (2017).

FIGURA 10 – POLARIZAÇÃO LHCP

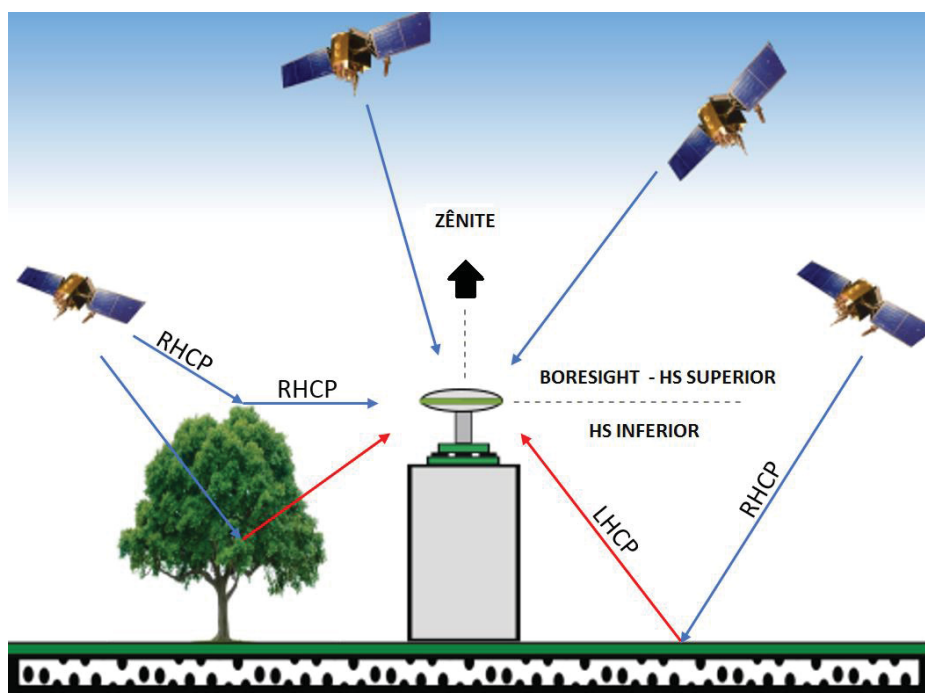


FONTE: Adaptado de Robb (2017).

Roussel et al. (2015), indicam que existe um ângulo limiar que permite estimar a ocorrência de inversão, o chamado Ângulo de Brewster. Para sinais refletidos provenientes de satélites com ângulos de elevação maiores que este ângulo tem-se predominantemente do tipo LHCP. Por sua vez, sinais indiretos provenientes de satélites com ângulos de elevação inferiores ao ângulo de Brewster, tem-se predominantemente sinais do tipo RHCP.

Ainda de acordo com Roussel (2015), este ângulo é de aproximadamente 8° quando a superfície refletora é a água do mar, e de 30° quando esta superfície for de cimento. Estas considerações evidenciam que a inversão de polarização é mais provável em sinais que atinjam a superfície com incidência próxima a normal.

FIGURA 11 – POLARIZAÇÃO DOS SINAIS



FONTE: O autor (2019).

Destaca-se que um sinal refletido pode sofrer outra reflexão, podendo ter sua polarização alterada novamente, tornando-se a cada reflexão mais fraco (com menor potência).

2.3.2 Ganho Padrão de Antenas GNSS

Considerando-se que os sinais diretos GNSS têm polarização do tipo RHCP e que grande parte dos sinais indiretos sofreram inversão de polarização passando a ser do tipo LHCP, as antenas geodésicas, visando minimizar a recepção de sinais indiretos, passaram a rejeitar parte dos sinais com polarização LHCP priorizando a recepção de sinais RHCP pelo hemisfério superior da antena. A taxa de rejeição destes sinais está ligada com o Ganho Padrão das antenas, o qual varia em função do azimuth e do ângulo de elevação do sinal. Ainda assim, apesar de existir essa filtragem, parte dos sinais refletidos são captados pela antena.

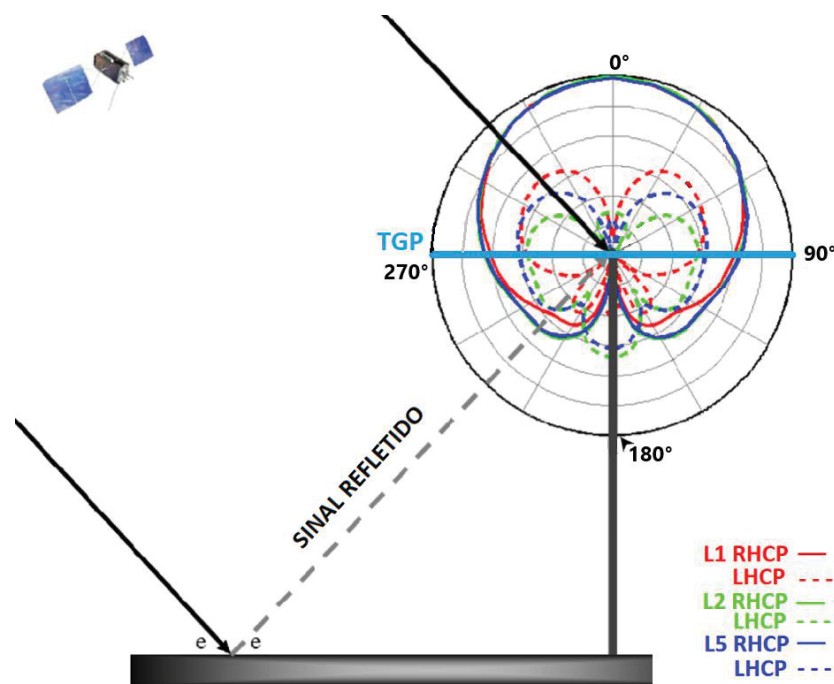
Conforme Teunissen e Montenbruck (2017), o ganho padrão de uma antena receptora está ligado à eficiência na conversão da onda eletromagnética recepcionada pela antena em energia elétrica, seguida da redistribuição espacial da potência disponível, a qual não ocorre perfeitamente em todas as direções. A redistribuição

homogênea em todas as direções acontece apenas em situações teóricas, nas quais esta antena teórica é dita polarimétrica, e é adotada como referência para se definir o ganho em antenas reais.

Conforme Roussel (2015), o ganho da antena é indicado pelos fabricantes por meio da razão entre as componentes ortogonais de um campo elétrico incidente no Zênite da antena. Esta razão é dita axial e em geral é expressa em decibéis (dB), na qual o valor de zero dB indicaria o caso ideal de uma polarização perfeitamente circular. Esta razão degrada com o distanciamento do Zênite da antena.

A tensão do sinal registrada é resultante da combinação do campo vetorial dos sinais de entrada e como ele interage com o padrão de ganho da antena. Na FIGURA 12 tem-se o perfil de uma antena GNSS e seu respectivo diagrama do ganho padrão. São indicados os ganhos em relação a três ondas portadoras GPS: L1 (Vermelho), L2 (Verde), e L5 (Azul). A polarização destas ondas é indicada, sendo que a linha contínua representando a polarização RHCP, e a linha tracejada LHCP. Percebe-se que o ganho padrão da antena, dado em dB é mais significativo no hemisfério superior da antena. Os hemisférios da antena são delimitados por meio do TGP (*Top of Ground Plane*).

FIGURA 12 – GANHO PADRÃO DE UM DADO MODELO DE ANTENA GNSS



FONTE: Adaptado de Tabibi et al. (2015).

2.3.3 Modelagem dos sinais refletidos

De acordo com Nievinski (2013), o campo elétrico da onda refletida ($\overline{E_r}$) é dado pela EQUAÇÃO 4:

$$\overline{E_r} = S * \overline{\overline{R}} * \overline{E_d} \quad (4)$$

Em que S é uma grandeza relacionada a rugosidade da superfície e dada certas considerações é representativo das perdas de potência coerente. $\overline{E_d}$ é o campo elétrico direto, e $\overline{\overline{R}}$ é a matriz de reflexão dada pela EQUAÇÃO 5:

$$\overline{\overline{R}} = R^S \overline{\overline{P}}^S + R^X \overline{\overline{P}}^X \quad (5)$$

Esta Matriz de reflexão ($\overline{\overline{R}}$) é determinada pela combinação das matrizes copolarizada $\overline{\overline{P}}^S$ (mesma polarização) e cross-polarizada $\overline{\overline{P}}^X$ (polarização cruzada); e dos coeficientes escalares de reflexão circularmente polarizados (R^S e R^X).

De acordo com Löfgren (2014), estes coeficientes são: R^S : Copolarizado – polarização RHCP; R^X : Cross-polarizado – polarização LHCP. Os referidos coeficientes circularmente polarizados, são definidos, respectivamente, conforme as EQUAÇÕES 6 e 7:

$$R^S = \frac{R^H + R^V}{2} \quad (6)$$

$$R^X = \frac{R^H - R^V}{2} \quad (7)$$

Conforme Gonçalves e Walter (2005), o vetor campo elétrico em uma polarização circular pode ser decomposto em duas componentes, uma vertical (R^V) e uma horizontal (R^H), mediante as EQUAÇÕES 8 e 9, respectivamente. (NIEVINSKI, 2013).

- Componente vertical

$$R^V = \frac{(\cos \theta - \xi)}{(\cos \theta + \xi)} \quad (8)$$

- Componente horizontal

$$R^H = \frac{(\varepsilon * \cos \theta - \xi)}{(\varepsilon * \cos \theta + \xi)} \quad (9)$$

Em que θ é o ângulo de incidência do sinal (elevação do satélite) e ε é a permissividade elétrica da superfície, a qual é composta por uma componente real e outra imaginária. (ξ). ξ é determinada pela EQUAÇÃO 10:

$$\xi = \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta} \quad (10)$$

Estes coeficientes têm relação com o campo eletromagnético da onda e contém informações do campo que chega a antena, o qual varia em função do ganho padrão da mesma.

As EQUAÇÕES 8, 9 e 10 requerem a determinação da permissividade (ε) do material que compõe a superfície de reflexão, a qual é dada pela EQUAÇÃO 11, conforme Roussel (2015).

$$\varepsilon = \varepsilon_r + j * 60 * \lambda * \sigma \quad (11)$$

Sendo: (ε) permissividade elétrica do material sobre o qual o sinal foi refletido; (ε_r), permissividade real relativa; j componente imaginária da permissividade ($\sqrt{-1}$); (λ), comprimento de onda; (σ) condutividade elétrica da superfície refletora.

Variações na superfície de reflexão, dentre as quais a da permissividade, que tem relação direta com o conteúdo de umidade do solo, implicam em variação dos

coeficientes de Fresnel, que por sua vez afetam a fase do sinal refletido em relação ao sinal direto (EQUAÇÃO 25).

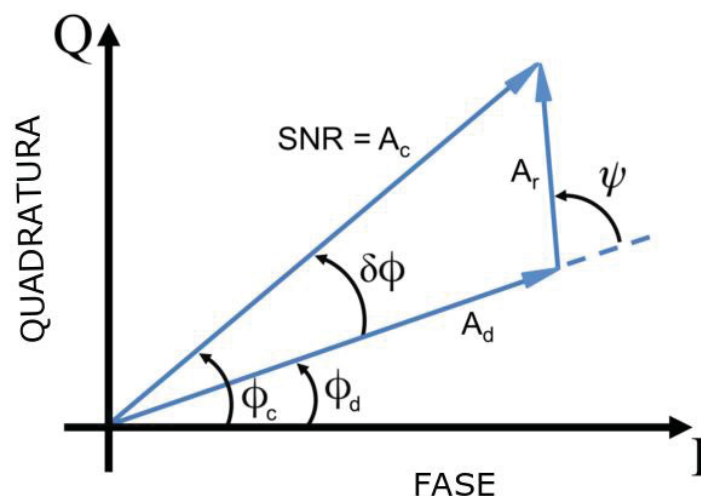
Ressaltando-se que a tensão elétrica no cabo de conexão entre antena e receptor também tem seu fator de impacto, pois influencia no campo elétrico assim como o comprimento efetivo da antena, ganho padrão e centro de fase.

Considerando que as interferências padrão provenientes do efeito do multicaminho e da variação da diferença de fase (ψ) entre os sinais diretos e refletidos, em função da movimentação dos satélites em suas órbitas, são visível no SNR, esta observável pode ser explorada para modelar o multicaminho.

Toda função senoidal pode ser representada por um fasores, os quais são vetores característicos da fase de um sinal, representando uma função senoidal por meio da Amplitude e da Fase. Neste âmbito, como as componentes elétrica e magnética da onda eletromagnética podem ser descritas por funções senoidais, as ondas portadoras podem ser descritas por meio de diagramas fasoriais considerando-se a relação entre as componentes de Quadratura e de Fase da função senoidal de amplitude modulada (LÖFGREN, 2014).

Na FIGURA 13 são ilustrados os três fasores característicos (do sinal recebido (A_c), do sinal direto (A_d), e do sinal refletido (A_r), e demais grandezas envolvidas, como as fases relativas a estes sinais.

FIGURA 13 – DIAGRAMA FASORIAL



FONTE: Adaptado de Löfgren (2014).

Sendo: (A_d) Amplitude do Sinal Direto; (ϕ_d) Fase do Sinal Direto; (A_r) Amplitude do Sinal Refletido, ou Indireto; (A_c) Amplitude do Sinal Composto, que é o sinal registrado na presença de sinais indiretos; (ϕ_c) Fase do Sinal Composto; (ψ) Ângulo de Fase relativo do sinal refletido em relação ao do sinal direto; (δ_ϕ) viés nas medidas de fase (LÖFGREN, 2014).

Destarte, em uma situação hipotética de um ambiente livre de multicaminho, o fasor seria representado por um único vetor (A_d), e o SNR seria proporcional à Amplitude do sinal direto. Voltando-se para situações reais, com a adição de sinais indiretos, surge o sinal composto, o qual contém o efeito de multicaminho.

O SNR, em termos práticos, é equivalente à amplitude do sinal composto, o qual é função do sinal direto e do indireto. Conforme Larson et al. (2007), os termos de amplitude incluem os efeitos do ganho padrão da antena e também os da atenuação do sinal indireto.

Pelo diagrama fasorial exposto, o valor do SNR e a extração de características dos sinais a partir desta observável podem ser efetuados, de acordo com de Bilich, Axelrad e Larson (2007).

Pelo diagrama (FIGURA 13) verifica-se que relações trigonométricas permitem determinar as equações 12 e 13. (LARSON ET AL., 2007) e (BILICH, LARSON e AXELRAD, 2008):

$$SNR = A_d^2 + A_r^2 + 2A_dA_r \cos(\psi) \quad (12)$$

Pela EQUAÇÃO 12 verifica-se que o SNR é dado por meio de dois termos quadrados e um termo trigonométrico, sendo estes as amplitudes dos sinais diretos e indiretos, assim como pelo ângulo de fase relativo ao sinal do refletido (ψ), que é dado pela diferença de fase entre o sinal direto e o sinal refletido. Esta grandeza é composta por um deslocamento de fase arbitrário do sinal refletido sobre o sinal direto, a qual incorpora o caminho físico adicional do sinal, bem como o deslocamento de fase proveniente da reflexão.

Quando a antena passa a registrar o sinal composto (multicaminho) a fase da onda portadora (sinal direto) passa a ser contaminada pelo erro de fase devido ao multicaminho (ϕ_{MP}). Isto afeta a determinação da pseudodistância pela fase da onda

portadora (EQUAÇÃO 3). O equacionamento de ϕ_{MP} é dado pela EQUAÇÃO 13 (BILICH, AXELRAD e LARSON, 2007).

$$\tan(\phi_{MP}) = \frac{A_r \sen(\psi)}{A_d + A_r \cos(\psi)} \quad (13)$$

De maneira análoga, o multicaminho afeta a pseudodistância a partir dos códigos. Estas formulações são fundamentadas no diagrama fasorial através de um sinal refletido simplificado para uma reflexão especular sobre uma superfície horizontal e plana, podendo ser estendido para múltiplos sinais.

O erro de fase devido ao multicaminho é diretamente medido através do SNR, o que não ocorre para as demais observáveis.

Considerando que o sinal sofre atenuação quando da reflexão e também que a recepção dos sinais refletidos é atenuada pelo ganho padrão das antenas GNSS, $A_r \ll A_d$. O que reforça a relação entre a amplitude do sinal e o ganho padrão da antena.

Assim, o SNR é caracterizado principalmente em função do sinal direto, o qual tem a característica de possuir grandes amplitudes e baixa frequência, ao passo que os sinais refletidos têm baixas amplitudes em relação aos sinais diretos, mas alta frequência (ROUSSEL, 2015).

Segundo Löfgren (2014), a determinação de (ψ) pode ser efetuada em função do trajeto adicional (δ) do sinal refletido em função do sinal direto. Para isto algumas simplificações são consideradas: a superfície de reflexão como um plano perpendicular à vertical que passa pelo eixo de simetria da antena e antena com altura fixa (h) . Com estas simplificações, (ψ) em radianos (rad), varia apenas em função da trajetória descrita pelos satélites, criando as oscilações padrão vistas no SNR.

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{4\pi h}{\lambda} \sen(\theta) \quad (14)$$

Sendo que h corresponde à altura da antena. A partir da diferença de fase entre os sinais (ψ) se pode determinar a frequência das oscilações do multicaminho em relação ao tempo (LÖFGREN, 2014).

$$f_{\psi} = \frac{d\psi}{dt} = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) + \frac{4\pi h}{\lambda} \cos(\theta) \dot{\theta} \quad (15)$$

Na EQUAÇÃO 15 considera-se a variação natural ocorrida entre a altura da superfície e do ângulo de elevação. No primeiro caso, a altura da superfície refletora em relação a antena pode variar em muitas aplicações, como nos casos de monitoramento do nível do mar em função da maré. Obtendo-se a taxa de variação da altura da antena: $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$

No segundo caso, a variação ocorre em função da trajetória constante descrita pelos satélites $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ (em radianos/s).

A EQUAÇÃO 15 pode ser simplificada com uma mudança de variável envolvendo o seno do ângulo de elevação do satélite, fazendo $\sin(\theta) = x$ (ROUSSEL ET AL., 2015), conforme segue:

$$\tilde{f} = \frac{d\psi}{dx} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(h \frac{\tan(\theta)}{\dot{\theta}} + h \right) \quad (16)$$

A depender da aplicação do GNSS-MR estas variações em relação ao tempo podem ser negligenciadas e as determinações podem ser efetuadas de maneira isolada para um dado ângulo de elevação com a altura da antena fixa (h).

Em outros casos, como no monitoramento da umidade do solo, a altura efetiva da antena não é necessariamente àquela medida no posicionamento GNSS, pois o poder de penetração das ondas no solo está diretamente ligado ao volume de água, portanto ocorre uma certa variação da altura da antena. Contudo, como esta variação de umidade é lenta, pode-se generalizar e considerar a altura constante para um dado intervalo de tempo. Assim sendo, a EQUAÇÃO 16 é simplificada:

$$\tilde{f} = \frac{d\psi}{dx} = \frac{4\pi h}{\lambda} \quad (17)$$

De modo geral, as características destas oscilações do multicaminho como Amplitude (A_m), Fase (ϕ_m) e Frequência (f_m) variam em função da composição sinal-meio-instrumento.

Enquanto (f_m) é dependente principalmente da geometria da composição superfície-antena, (A_m) depende predominantemente da refletividade da superfície que, por sua vez, é diretamente relacionada à permissividade da superfície de reflexão, a qual é considerada nas equações de Fresnel.

Deste modo, as variações de frequência, amplitude e fase do sinal refletido, observadas através de oscilações do SNR, podem ser empregadas na detecção de variações nas propriedades acerca das superfícies de reflexão e podem ser determinadas através do SNR. Cada um destes atributos dos sinais pode ser mais sensível a uma dada propriedade das superfícies. Na EQUAÇÃO 18 o SNR é descrito em termos de Amplitude e Fase:

$$SNR = A_m \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) + \phi_m\right) \quad (18)$$

2.3.4 Abrangência das reflexões

A área de entorno da antena GNSS, correspondente à superfície que proporciona reflexões, é determinada em função da altura da antena e do ângulo de elevação dos satélites. Katzberg et al (2006), afirmam que os sinais dos satélites, mesmo considerando um ângulo de elevação específico, não atingem um único ponto, mas sim uma vasta região, tornando complexa a delimitação da área de reflexão. Contudo, aproximações podem ser efetuadas neste sentido, considerando: reflexões especulares, com isto o mesmo ângulo de incidência é o ângulo de reflexão; e topografia desta área plana e horizontal.

Com isto, esta área pode ser determinada pelas Primeiras Zonas de Fresnel, as quais são definidas por elipses relativas a cada trajetória de um dado satélite em função de um dado ângulo de elevação, da altura da antena e do comprimento de onda do sinal (LARSON e NIEVINSKI, 2012). Como diversos satélites são observados durante o rastreo considerado, a superfície será definida por um conjunto de elipses.

As EQUAÇÕES 19 e 20 (LARSON e NIEVINSKI, 2012), indicam a formulação para cálculos de uma elipse definida por seus semieixos maior (a) e menor (b), da Zona de Fresnel considerando uma estação GNSS.

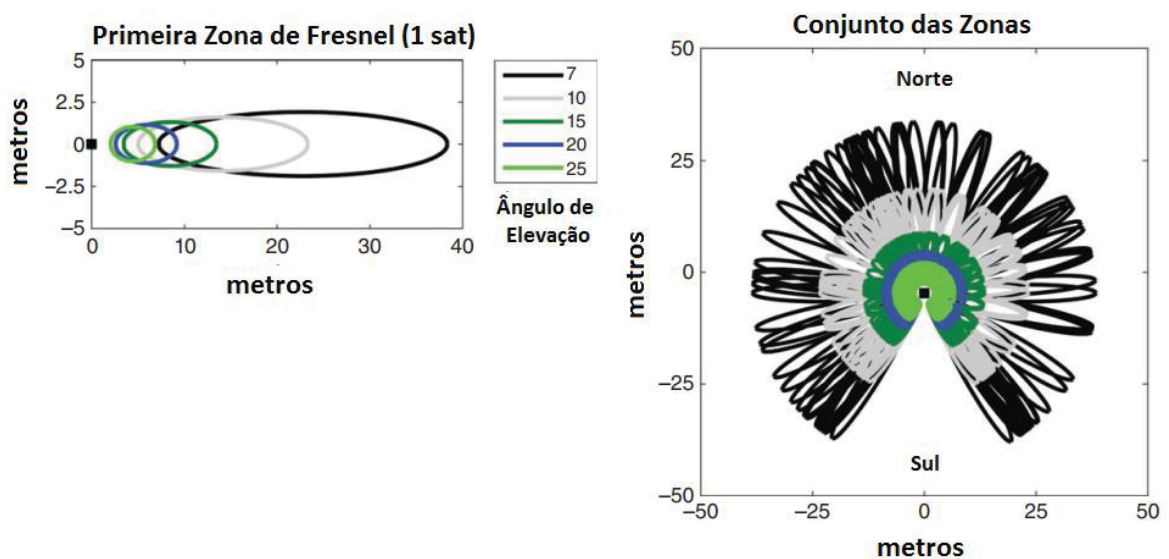
$$a = \frac{b}{\sin \theta} \quad (19)$$

$$b = \sqrt{\frac{2d h}{\sin \theta} + \frac{d}{(\sin \theta)^2}} \quad (20)$$

Nas quais h corresponde a altura da antena; $d = n \frac{\lambda}{2}$, com $n = 1$ indicando a primeira Zona. O semieixo maior é posicionado ao longo da trajetória do satélite, ao passo que o respectivo semieixo menor é perpendicular ao mesmo.

Na FIGURA 14 apresenta-se a Zona de Fresnel para um satélite (esquerda) e o conjunto de Zonas de Fresnel para uma dada estação GPS simulada, com altura de antena de 1,8 m (direita). Verifica-se as diferentes elipses dadas em função do ângulo de elevação.

FIGURA 14 – ZONA DE FRESNEL



FONTE: Adaptado de Larson (2016).

Destaca-se que quanto maior for o ângulo de elevação, menor será a respectiva elipse. Assim sendo, sabendo que os satélites estão em constante movimento, portanto com variações no ângulo de elevação, a superfície refletora é também variável com o tempo.

Nota-se que as Zonas não se distribuem uniformemente no entorno da estação GNSS (centro do conjunto de Zonas), isto ocorre devido à inclinação das órbitas dos satélites GPS. Devido a inclinação das orbitas dos satélites não há passagem de satélites na direção sul da estação e arredores. Para estações situadas no Hemisfério Norte a mesma situação ocorreria, porém na direção Norte.

2.4 REFLETOMETRIA GNSS

O conceito da Refletometria GNSS foi proposto pela primeira vez por Martin-Neira em 1993 visando efetuar sensoriamento remoto através do aproveitamento dos sinais refletidos pelo GPS para a determinação da altimetria oceânica. Nesta oportunidade o conceito foi denominado por este autor de PARIS (*Passive Reflectometry and Interferometric System*).

Este conceito, pouco a pouco, foi despertando interesse por parte de pesquisadores para as mais diversas aplicações, visto que a Refletometria por GNSS apresenta vantagens, dentre as quais, pode-se citar o uso de sinais GNSS que são transmitidos continuamente, e o baixo custo da instrumentação necessária, conforme indicado por Zavorotny et al. (2015). Destaca-se que sistemas como o GPS e o GLONASS possuem cobertura global e estão em plena operação. Pode-se contar, atualmente, com cerca de 60 satélites apenas considerando estes dois sistemas, tendo-se com isto, uma boa resolução temporal para aquisição de dados graças à repetibilidade das trajetórias em termos de azimutes de passagem.

Com a modernização do GNSS, novas constelações como o Galileo, COMPASS-BeiDou, além dos regionais IRNSS e QZSS, entrarão em operação. Além disso, novos sinais estão sendo introduzidos, dentre os quais, a onda portadora L5 e os códigos L2C e L1C, ampliando as possibilidades para se atingir melhores precisões nas mais diversas aplicações em que o GNSS-R possa ser empregado.

Conforme exposto por Roussel (2015), o princípio da Refletometria por GNSS (GNSS-R) consiste na análise da diferença entre os sinais que chegam na antena receptora de maneira direta e aqueles que são recepcionados após reflexão e que

consequente são influenciados pela interação com as superfícies refletoras e que podem fornecer informações acerca destas superfícies.

Por meio desta técnica podem-se estimar, graças à frequência, amplitude e fase dos sinais indiretos, propriedades relacionadas a estas superfícies tais como o conteúdo volumétrico de umidade do solo e rugosidade da superfície; e também parâmetros geométricos, como a altura efetiva da antena receptora com relação à superfície de reflexão, e com isto, variações na altura de camadas de neve, crescimento da vegetação e variações no nível instantâneo do mar.

O GNSS-R apresenta-se como uma técnica geodésica fortuita que permite a realização de sensoriamento remoto a curta distância (NIEVINSKI, 2013). As determinações oriundas do GNSS-R podem atingir diferentes níveis de abrangência, que dependem principalmente da altura da antena e da topografia local. Estações GNSS instaladas sobre pontos situados próximos a superfície, como nas aplicações voltadas ao posicionamento alcance um nível local. Por sua vez, tem-se um alcance maior, ou seja, maior área de detecção considerando uma dada posição (*Footprint*), quando a antena receptora é fixada em plataformas aéreas, como em aviões, e VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados).

Em se tratando das especificidades do GNSS-R, uma classificação quanto a metodologia empregada para se efetuar a recepção dos sinais indiretos está relacionada à configuração das antenas GNSS:

- Método Biestático: Conforme Jia e Pei, este método é baseado na recepção separada do sinal direto e do sinal indireto através de um sistema específico composto por duas antenas, uma é orientada de maneira convencional para o Zênite visando a recepção dos sinais diretos, ao passo que a segunda antena é orientada de maneira a captar os sinais refletidos. Nestes casos, pode-se ter diferentes combinações de registro dos sinais através de antenas com diferentes polarizações. Ex: Martin-Neira (1993), Katzberg et al. (2006), Löfgren (2014).
- Antena Singular em posição convencional: Neste caso, utiliza-se apenas uma antena que capta tanto o sinal direto como o indireto com a antenas GNSS com posição convencional (FIGURA 11), *boresight* voltado ao Zênite. Ex: Larson et al (2008), Nievinski (2013).

- Antena Singular em posição distinta: Uma única antena receptora de ambos os sinais, diretos e indiretos, contudo com o *boresigth* voltado, normalmente ao horizonte. Ex: Rodriguez-Alvarez et al. (2009), Caleechurn (2009), Rodriguez-Alvarez et al. (2011).

O multicaminho afeta todas as observáveis GNSS, com isto, a Refletometria GNSS pode ser efetuada pela medida do código (pseudodistância), doppler, onda portadora (fase) ou SNR. Dentre estas, o SNR apresenta a vantagem, segundo Larson et al. (2008), de proporcionar um baixo nível de ruído na determinação da fase do sinal indireto e de não ser dependente dos erros relativos às órbitas, atrasos atmosféricos, erros de relógios. Além disso, permite que os dados sejam avaliados para cada satélite individualmente, o que não ocorre com as demais observáveis.

2.4.1 GNSS-MR

A técnica GNSS-MR, ou Refletometria GNSS por Multicaminho, é uma modalidade do GNSS-R que, segundo Nievinski (2013), com o emprego dos sinais de Multicaminho captados por antenas e receptores convencionais⁴.

Conforme Nievinski e Monico (2016), quando a antena recebe o sinal de entrada, o qual contém o sinal direto e os sinais refletidos provenientes de múltiplos caminhos, registra-se a potência (P), a qual é composta por duas componentes, a potência direta (P_d) e a potência refletida (P_r) acrescidas de um termo trigonométrico ditado pela diferença de fase entre estas duas potências (ϕ_i), dita fase interferométrica. A potência do sinal é determinada pela EQUAÇÃO 21:

$$P = P_d + P_r + 2\sqrt{P_d}\sqrt{P_r}\cos\phi_i \quad (21)$$

A diferença de fase dada pelo sinal direto e o sinal refletido, varia conforme o movimento dos satélites em suas orbitas, criando uma interferência padrão que é vista como oscilações nas séries temporais do SNR, estas interferências são avaliadas no

⁴ Chamou-se de equipamentos GNSS convencionais aqueles empregados no posicionamento GNSS

GNSS-MR. A EQUAÇÃO 22 mostra que o SNR, cuja unidade é em watts/watts, é composto por duas componentes:

$$SNR = tSNR + dSNR \quad (22)$$

Sendo $tSNR$ a tendência SNR, e $dSNR$ caracteriza as franjas de interferência do SNR. Conforme Nievinski e Mônico (2006), estas franjas representam as interferências que influenciam a potência a medida que os sinais diretos e refletidos entram e saem de fase. Estas grandezas são dadas pelas EQUAÇÕES 23 e 24 para $tSNR$ e $dSNR$ respectivamente (NIEVINSKI, 2013):

$$tSNR = (P_d + P_r)P_n^{-1} = P_d (1 + P_i)P_n^{-1} \quad (23)$$

$$dSNR = 2\sqrt{P_d}\sqrt{P_r} P_n^{-1} \cos\phi_i \quad (24)$$

Nas quais P_n é a potência do ruído, e P_i é a potência interferométrica. A fase interferométrica (ϕ_i) é dominada pelo atraso de propagação proveniente do percurso adicional de propagação do sinal refletido. Esta grandeza é definida pela EQUAÇÃO 25, na qual $\phi_X = \arg(X)$ representa a combinação das propriedades da superfície refletora e da antena GNSS, é neste termo em que os coeficientes de reflexão são considerados; τ_i é o atraso interferométrico da propagação; k é o número de onda, que é inversamente proporcional ao comprimento de onda ($k = 2\pi/\lambda$); e Φ_d^R é a contribuição do sinal direto RHCP na fase da antena (TABIBI et al., 2015).

$$\phi_i = \phi_X + k\tau_i - \Phi_d^R \quad (25)$$

Tabibi et al. (2015), indicam que para uma superfície horizontal, o atraso interferométrico τ_i pode ser estimado como função do ângulo de elevação do satélite e da altura da antena, conforme EQUAÇÃO 26, na qual H é a distância contada ao longo da vertical entre o centro de fase da antena e a superfície de reflexão, a qual

em função da profundidade de penetração da onda eletromagnética no solo, não é necessariamente a dita altura da antena.

$$\tau_i = 2H \sen e \quad (26)$$

Algumas manipulações podem ser efetuadas tendo em vista o número de parâmetros que seriam necessários modelar para se determinar a fase interferométrica, neste âmbito, ϕ_X e Φ_d^R podem ser aproximados previamente e considerados fixos, visto que envolvem características das propriedades da superfície e do ganho padrão da antena, respectivamente, assim, a equação da fase interferométrica pode ser aproximada conforme EQUAÇÃO 27, pela qual torna-se evidente a dependência de H e da elevação do satélite.

$$\phi_i \approx \frac{4\pi}{\lambda} H \sen e \quad (27)$$

Roesler e Larson (2018), indicam que existem diferentes denominações desta técnica por parte dos pesquisadores e grupos de pesquisa, algumas destas visando destacar alguma especificidade, como no caso da posição da antena, porém o método é o mesmo. Dentre estas denominações tem-se: GPS-IPT (*GPS-Interference Pattern Technique*) por Rodriguez-Alvarez et al., (2011), e GNSS-IR (*GNSS Interferometric Reflectometry*) por Zhang et al., (2018).

Diversas são as aplicações nas quais se pode utilizar o GNSS-MR. Este método inovador apresenta a vantagem a possibilidade do emprego de equipamentos convencionais, desta forma, surge a possibilidade de aproveitar os dados que são continuamente registrados por estações GNSS existentes, possibilitando estimar informações do entorno. Boniface et al. (2015), indicam que uma vantagem é a área de abrangência, vista que proporciona monitoramento em escala intermediária.

No contexto da umidade do solo, Chew et al. (2014) e Larson et al. (2007) destacam que, como o poder de penetração das ondas eletromagnéticas varia em função da umidade próxima à superfície, isto causa variações na altura efetiva da antena e, com isto, também na frequência do sinal refletido em função da variação da geometria, bem como na amplitude. Contudo, a (ϕ_m) é a característica dos sinais

mais sensível aos efeitos de variação na umidade do solo, visto que ela é dada em função da composição da superfície, da diferença de fase entre os sinais e do padrão de fase da antena.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente pesquisa se almejou avaliar as potencialidades e o desempenho do GNSS-MR na quantificação do conteúdo volumétrico de umidade próxima a superfície do solo e suas variações no entorno de uma estação situada no município de Cachoeira Paulista – SP.

Para isto foram utilizados dados referentes à uma campanha com 16 meses de duração entre junho de 2014 a outubro de 2015, de um rastreamento contínuo GNSS efetuado por um receptor Trimble NetR8, GPS e GLONASS, com antena *Choke-Ring*, modelo TRM29659.00.

A duração da campanha para coleta destes dados foi definida em função das limitações logísticas. Esta duração é superior a um ano, portanto, abrange todas as estações do ano, o que é muito importante em se tratando do monitoramento de um fenômeno natural, como a umidade do solo.

Simultaneamente a umidade do solo foi monitorada por meio de três sondas de capacitância modelo PR1 da fabricante Delta-T Devices Ltd, instaladas no entorno da estação GNSS, bem como, por uma sonda de nêutrons da COSMOS (*Cosmic-Ray Soil Moisture Observing System*), que é uma rede global de monitoramento de umidade do solo da Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos (*US National Science Foundation*).

Os levantamentos efetuados por estas sondas foram adotados para validar os resultados de umidade do solo obtidos por meio do GNSS-MR. Para isto, efetuou-se o devido tratamento dos dados das sondas, bem como a avaliação da performance destes equipamentos.

A determinação da umidade do solo por GNSS-MR foi efetuada via algoritmo refletométrico desenvolvido por Nievinski e Larson (2013, 2014a, 2014b, 2014c) e adaptado para emprego na umidade do solo por Tabibi et al. (2015). Através deste algoritmo foram processados 5 sinais GNSS: GS1C (C/A - L1) e GS2X (L2C) do GPS; e RS1C ("C/A" - L1), RS1P ("P" - L1), e RS2P ("P" - L2) do GLONASS; e também um sinal médio gerado a partir destes cinco sinais, ao qual denominou-se MGNSS.

A nomenclatura aqui apresentada para os sinais está de acordo com a padronização do RINEX versão 3.03, além disto, ressalta-se que os termos entre aspas referentes ao GLONASS não são oficiais, embora sejam abordados por muitas literaturas. Obteve-se ao final deste processo 6 séries temporais de umidade do solo.

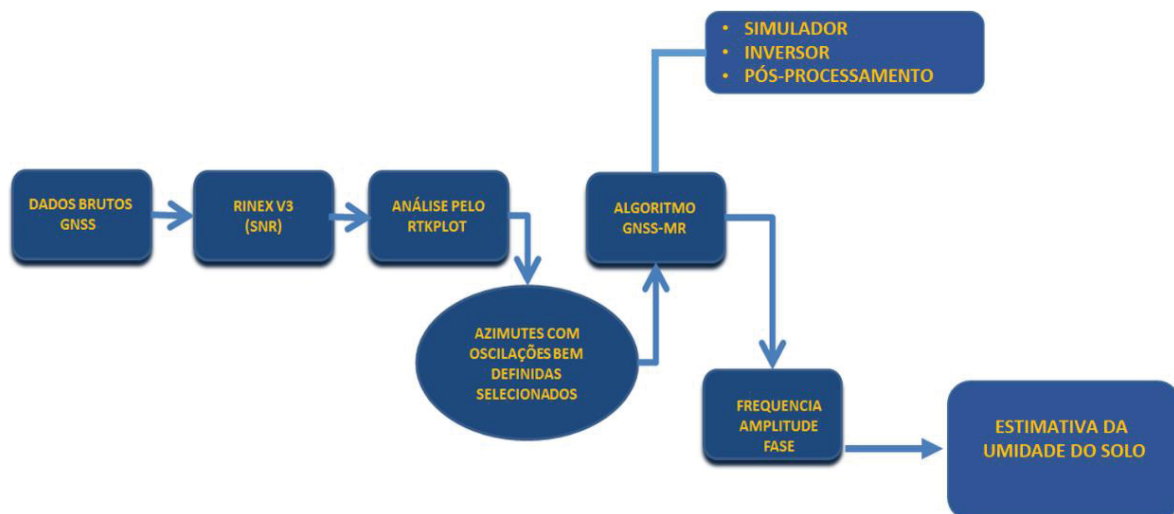
Uma série adicional foi gerada para se avaliar as respostas obtidas pelo GNSS-MR frente a uma menor amostragem de dados.

O desempenho da técnica foi avaliado através de inferências estatísticas entre cada uma das séries temporais GNSS e as séries temporais obtidas pelas três sondas de capacitância, aqui denominadas sonda A, B e C, e pela sonda COSMOS.

Estas séries foram confrontadas com dados meteorológicos, visando a avaliação da técnica frente a eventos de precipitação e consequentemente, de aumento no volume de umidade do solo.

Nesta seção serão apresentadas a área de estudo e as etapas desenvolvidas para realizar a avaliação das potencialidades do GNSS-MR na quantificação da umidade do solo. Além disto, são descritos os materiais e métodos empregados nesta pesquisa. O fluxograma mostrado na FIGURA 15 indica as etapas concernentes a metodologia.

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA



FONTE: O autor (2019).

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no município de Cachoeira Paulista – SP, nas dependências do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial – INPE, Unidade Regional Cachoeira Paulista, com coordenadas geodésicas 22°40'46,9"S, 44°59'53,5"W (WGS84). Ela está situada nas dependências do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e é apontada na FIGURA 16.

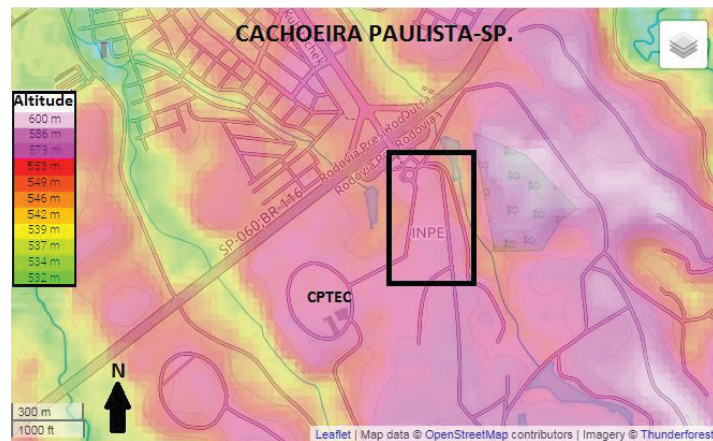
FIGURA 16 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: O autor (2019).

A área monitorada pode ser considerada com topografia plana (FIGURA 17) sendo o solo coberto por vegetação predominantemente gramínea. Pela FIGURA 18 tem-se uma imagem panorâmica centrada a oeste da estação GNSS.

FIGURA 17 – TOPOGRAFIA DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: Adaptado de OpenStreetMap (2019).

FIGURA 18 – VISTA PANORÂMICA OESTE



FONTE: Adaptado de Nievinski e Sapucci (2014).⁵

Através desta imagem pode-se verificar que não existem obstruções significativas nesta direção. A esquerda, correspondente a direção Sul, verifica-se a sonda COSMOS. Na FIGURA 19 apresenta-se a imagem panorâmica da direção Leste.

FIGURA 19 – VISTA PANORÂMICA LESTE



FONTE: Adaptado de Nievinski e Sapucci (2014).

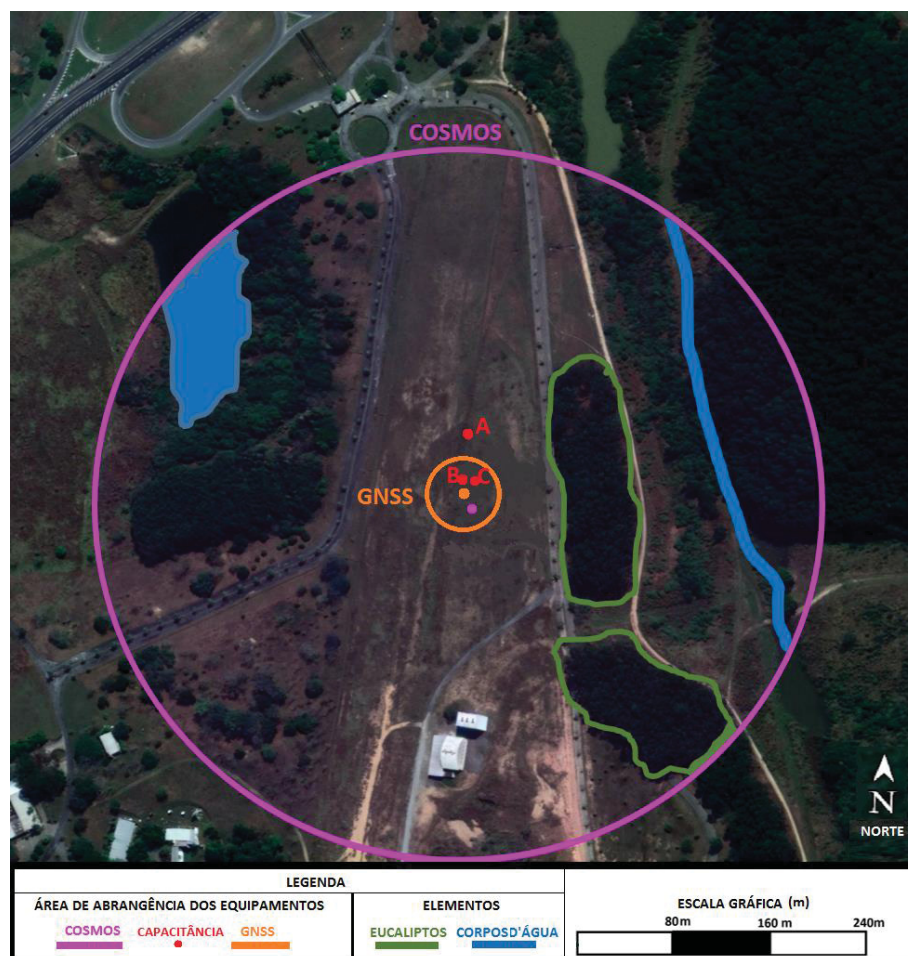
Verifica-se nesta figura a existência de árvores (eucaliptos) com altura de aproximadamente 30 metros, apresentando-se como obstruções a recepção de sinais GNSS provenientes desta direção.

⁵ NIEVINSKI, F.G.; SAPUCCI, L.F. Cachoeira Paulista, 2014. Material não publicado.

3.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Conforme exposto, a campanha teve uma duração total de 16 meses. Os rastreios foram efetuados de maneira simultânea entre uma antena geodésica GNSS, três sondas de capacitância (A, B e C), e uma sonda COSMOS. A disposição em que estes equipamentos foram instalados, bem como suas respectivas áreas de abrangência são apresentadas na FIGURA 20.

FIGURA 20 – DISPOSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS



FONTE: O autor (2019).

A sonda A foi instalada a aproximadamente 50 m da estação GNSS na direção Norte, sendo que as sondas B e C foram instaladas também nesta direção a 10 m da estação e paralelamente entre si com afastamento de cerca de 3 m. Por sua vez, a sonda COSMOS está implantada na direção Sul, distando aproximadamente 14 m da estação.

Os círculos representam as áreas de abrangência dos equipamentos. A sonda COSMOS tem o maior alcance, sendo este de aproximadamente 300 metros no entorno da sonda instalada. A área de abrangência do GNSS-MR é de aproximadamente 30 metros, e por fim apresenta-se a localização das sondas de capacitância (A, B e C) que proporcionam informações pontuais.

3.2.1 Rastreio GNSS

Os rastreios GNSS foram efetuados utilizando-se um receptor Trimble NetR8 (GPS+GLONASS), com antena Trimble do tipo *Choke-Ring* (TRM29659.00) a qual dispõe, além das tradicionais ondas portadoras L1 e L2, o sinal L2C. O intervalo de gravação utilizado foi de 1 Hz. Na FIGURA 21 estes equipamentos são destacados.

FIGURA 21 – EQUIPAMENTOS GNSS



FONTE: Adaptado de Nievinski e Sapucci (2014).

3.2.2 Rastreio Sondas PR1

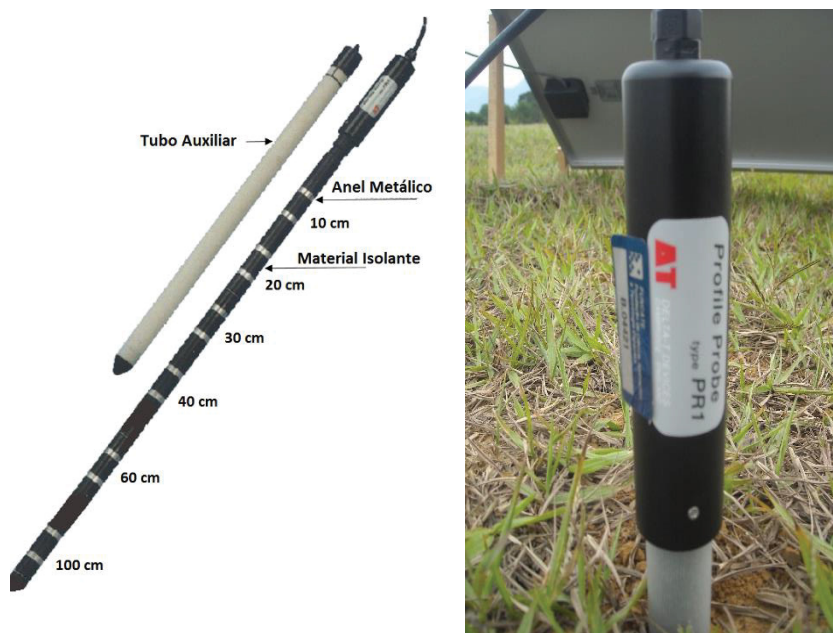
As sondas de capacitância empregadas foram do modelo PR1, da Delta-T Devices Ltd. Esta é uma sonda de perfilamento da umidade do solo, que efetua suas determinações explorando a permissividade do solo pelo método FDR (Seção 2.1.1.2), a partir de 6 sensores dispostos ao longo de um bastão nas seguintes profundidades 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm (FIGURA 22). O campo eletromagnético gerado pelos sensores tem alcance de cerca de 10 cm, sendo este o raio de alcance desta sonda.

Os dados diretamente medidos pela sonda, dados em Volts, foram convertidos em umidade do solo (m^3/m^3), com registro dos dados a cada minuto. A conversão foi efetuada automaticamente via *Data Logger*, por meio de uma função considerando as características do solo local, por meio de valores dos coeficientes do polinômio de conversão em umidade definidos de forma genérica pelo fabricante.

Os coeficientes generalizados disponibilizados pela Delta-T Devices Ltd, são estabelecidos para dois tipos de solo: ricos em matéria orgânica; ou ricos em minerais (FIGURA 4). Estes coeficientes podem ser refinados caso o usuário efetue a calibração *in loco*. A EQUAÇÃO 28 refere-se ao polinômio de conversão definido pela Delta-T Devices Ltd (2001), onde a_0 e a_1 são os referidos coeficientes.

$$US_v = \frac{[0,65 + 13,6V - 29,9V^2 + 72,5V^3] - a_0}{a_1} \quad (28)$$

FIGURA 22 – SONDA PR1



FONTE: Adaptado de Delta-T Devices Ltd (2001) e Nievinski e Sapucci (2014).

De acordo com a Delta-T Devices Ltd (2001), a precisão nominal deste equipamento é $0,06 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Neste valor estão considerados o desvio padrão do equipamento e os erros relacionados a calibração do instrumento.

3.2.3 Rastreo Sondas COSMOS

A sonda utilizada nesta pesquisa, modelo CRS-1000/B da fabricante Hydroinnova, é a estação (CPTEC INPE), FIGURA 23, pertencente ao sistema de observação global de umidade do solo (COSMOS) e foi instalada em maio de 2014, tendo taxa de contagem máxima de 3000 neutros/hora. Este sistema é administrado pela Divisão de Ciências Atmosféricas e Geoespaciais da Fundação Nacional de Ciência dos Estados Unidos.

FIGURA 23 – SONDA COSMOS CPTEC INPE

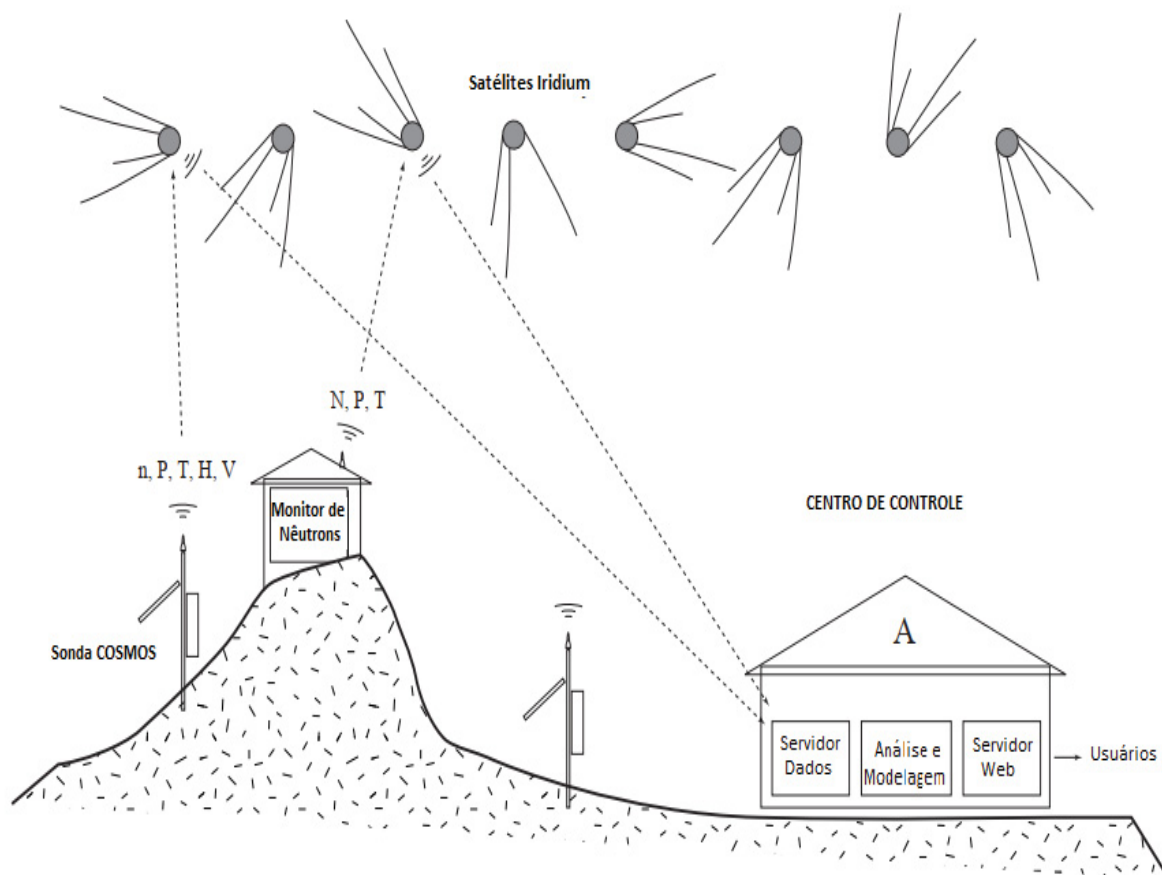


FONTE: Nievinski e Sapucci (2014).

Os dados coletados são enviados através de um sistema de transmissão por satélites da constelação Iridium, a um centro de controle, no Arizona-EUA, responsável pela modelagem e disseminação das informações.

Na FIGURA 24 o esquema de funcionamento deste sistema é apresentado, sendo: n a taxa de contagem de nêutrons rápidos; P a pressão atmosférica; T a temperatura do ar; H a umidade relativa do ar; V a tensão da bateria; e N a taxa de contagem de nêutrons de alta energia.

FIGURA 24 – SISTEMA COSMOS



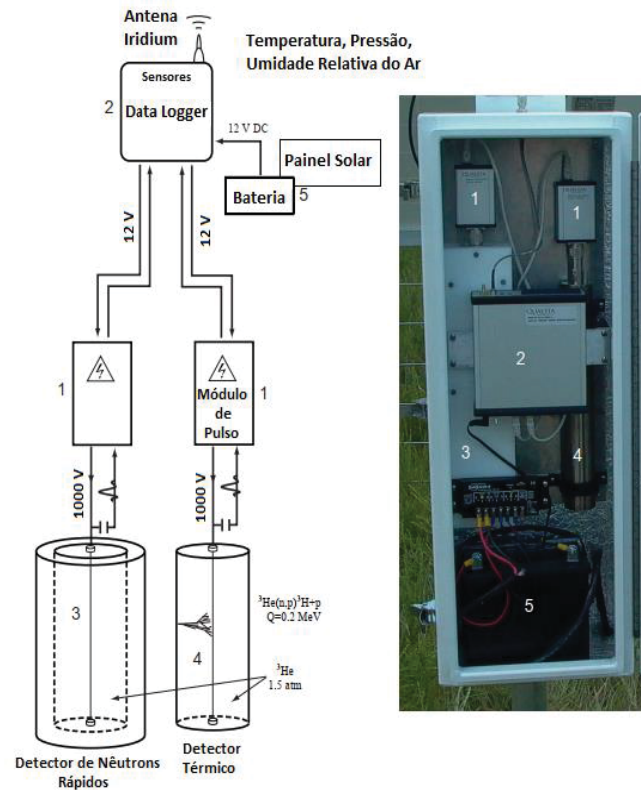
FONTE: Adaptado de Zreda et al. (2012).

Na FIGURA 25 são ilustradas as principais componentes deste equipamento. Os detectores de nêutrons rápidos (3) e térmicos (4), são conectados aos módulos de pulso eletrônico (1), que por sua vez são conectados ao *data logger* (2), o qual recebe também informações provenientes de demais sensores que medem pressão barométrica, temperatura e umidade relativa do ar.

O sistema é alimentado de maneira autônoma através de bateria que é recarregada por energia solar (5). Os dados coletados são enviados através do sistema de telemetria via satélite, para isto conta-se com a antena Iridium também conectada a este *data logger*.

O acesso aos dados COSMOS é efetuado via internet, através da página: <<<http://cosmos.hwr.arizona.edu/>>>.

FIGURA 25 – COMPONENTES DA Sonda COSMOS



FONTE: Adaptado de Zreda et al. (2012).

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

O tratamento dos dados coletados foi necessário visando possibilitar a comparação das séries temporais de umidade do solo pelos diferentes sensores e técnicas. Para isto, efetuou-se a edição dos arquivos de rastreo, padronização dos dados resultantes de cada instrumento, incluindo a conversão de unidades, filtragem de dados e demais manipulações. A unidade definida como padrão para avaliação da umidade foi m^3/m^3 relacionada ao volume de umidade (água) presente em um dado volume do solo.

A organização dos dados de entrada foi uma etapa fundamental, visto que, o processamento das séries GNSS-MR pelo algoritmo refletométrico e as posteriores comparações com as séries das sondas foram automatizadas através de rotinas em Matlab devido ao grande volume de dados.

3.3.1 Dados GNSS

Os arquivos de rastreo, em seu formato original binário (T01) da Trimble, foram convertidos para o formato RINEX, versão 3.03, pois nesta versão o SNR, que é a observável de interesse no GNSS-MR, é registrada considerando as diferentes frequências, sendo requisito do software refletométrico.

Para converter estes arquivos utilizou-se o software “Convert to RINEX”, do mesmo fabricante, o qual pode ser baixado de maneira gratuita pelo seguinte endereço eletrônico: <http://www.trimble.com/support_trl.aspx?Nav=Collection40773&pt=Trimble%20RINEX>.

Uma rotina de processamento para acesso direto a este software via prompt de comando foi criada visando contornar as limitações como intervenções manuais impostas pela interface gráfica do software. Para isto, utilizou-se a MINGW (*Minimalist GNU for Windows*). Esta é uma plataforma de ambiente UNIX dentro do Windows que permite acessar softwares e suas ferramentas através de linhas de comando, possibilitando criar rotinas para gerar automação de processos envolvendo estes softwares.

Como resultado desta etapa foram gerados os arquivos diários RINEX.o (arquivo de observação do RINEX), RINEX.n (arquivos de navegação do GPS), e RINEX.g (arquivos de navegação do GLONASS). Embora tenham-se gerado estes três tipos de arquivo, apenas o RINEX.o é empregado no algoritmo refletométrico pois os dados de navegação são obtidos via efemérides precisas baixadas diretamente do IGS.

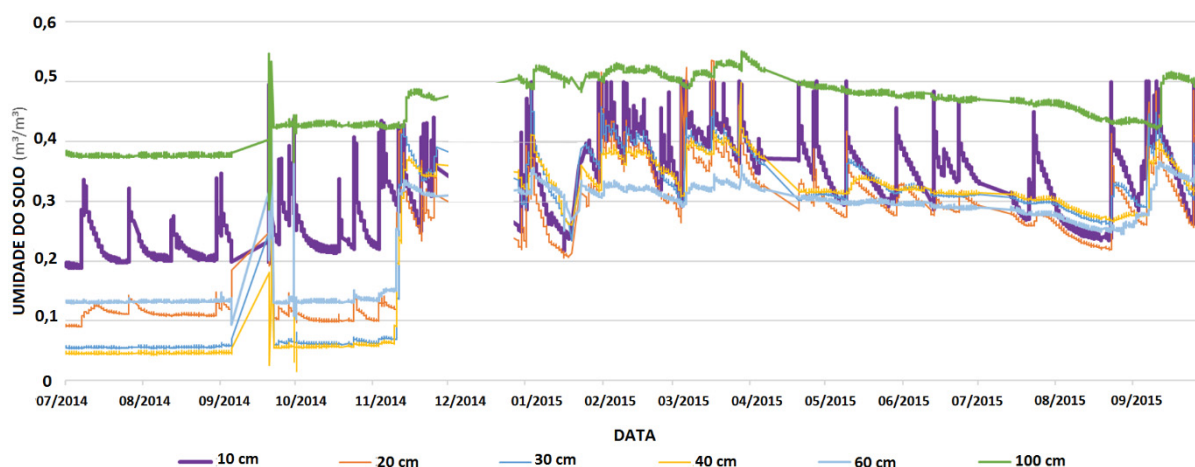
Por meio do programa GFZRNX foram extraídas deste arquivo de observação RINEX as observações de interesse para este estudo. Este programa GFZRNX é um software que permite efetuar conversão e manipulação de arquivos RINEX, por linhas de comandos, tendo o diferencial de ser compatível com a versão 3 do RINEX diferentemente de seu semelhante TEQC.

Ainda através deste programa modificou-se a amostragem para 30 segundos, visto que uma amostragem de 1 segundo não se faz necessária em termos de umidade do solo.

3.3.2 Dados PR1

Pelas sondas PR1 obteve-se inúmeras informações, dentre as quais os valores de tensão, condutividade, precipitação, temperatura, pressão e de umidade do solo para cada um dos seis sensores de cada sonda. Efetuou-se a padronização dos dados e eliminação de dados espúrios e inconsistências. Além disto, avaliou-se o comportamento das determinações da umidade do solo sob as diferentes profundidades. Ao se analisar a FIGURA 26, referente ao perfil da umidade do solo, verifica-se que esta grandeza varia em função da profundidade.

FIGURA 26 – PERFIL DE UMIDADE DO SOLO POR UMA SONDA PR1



FONTE: O autor (2019).

Observando-se a FIGURA 26, percebe-se que quanto maior a profundidade, mais constante é a umidade do solo ao longo do tempo. Isto pode ser visto pela linha verde correspondente a profundidade de 100 cm. Contrariamente, quanto mais próximo o sensor estiver da superfície do solo, maiores são as variações desta grandeza.

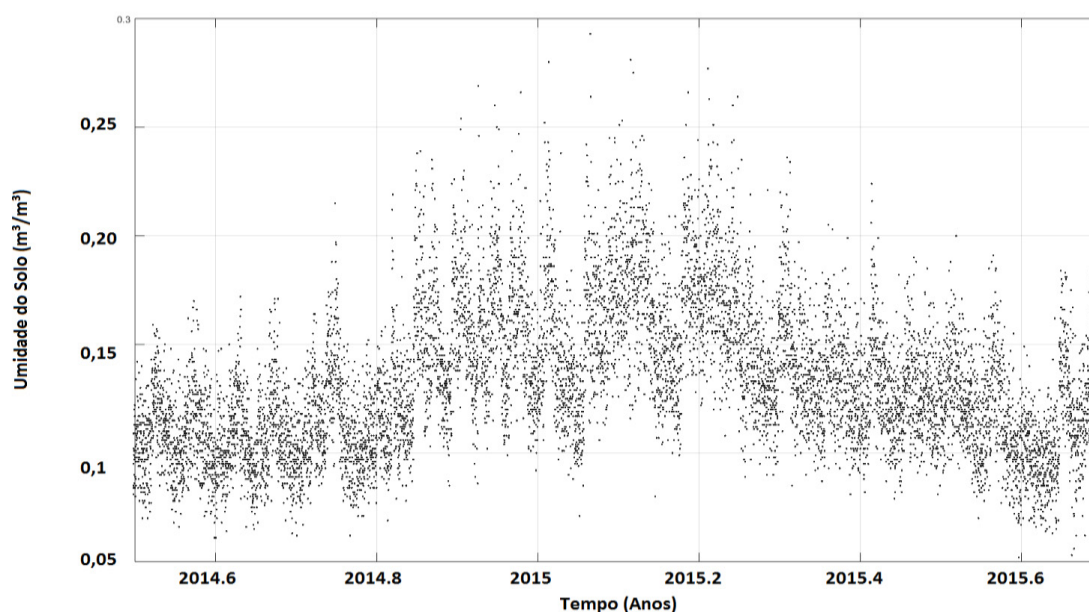
Verificou-se a ocorrência de muitos dados espúrios obtidos pela sonda A, tendo sido encontrados valores negativos, e superiores a 1, os quais representam inconsistências em se tratando de umidade do solo (m^3/m^3). Houve registro de dados não numéricos (NaN). Isso ocorreu de maneira esparsa ao longo de todo o período de observação, agravando-se no mês de setembro 2014.

No mês de dezembro de 2014 (12/2014), devido a questões técnicas e de logística os dados das sondas PR1 assim como do rastreo GNSS não foram registrados. Esta descontinuidade nas séries pode ser observada na FIGURA 26.

3.3.3 Dados COSMOS

Os dados resultantes da sonda Cosmos apresentam grande variabilidade de valores, visto que efetuam a avaliação de nêutrons a taxa de 3000 neutros/hora. Além disso, a área de abrangência destas determinações é variável em função do local, e atinge centenas de metros, portanto em diferentes níveis de umidade. Na FIGURA 27 os dados referentes ao período de observação são apresentados. Pode-se verificar a variabilidade nos valores de umidade.

FIGURA 27 – DADOS SONDA COSMOS



FONTE: O autor (2019).

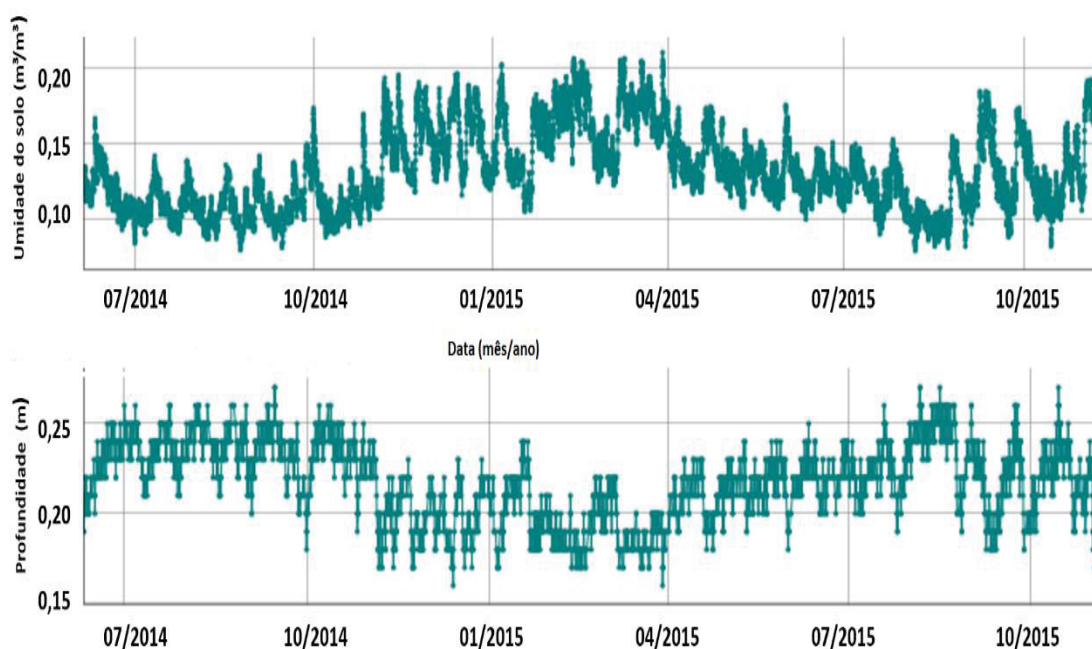
De acordo com Zreda et al. (2012), as precisões alcançadas por este equipamento envolvem um grande número de variáveis, devendo ser considerado: o local de interesse, a calibração do instrumento, composição do solo, sendo tipicamente inferior a $0,01\text{m}^3/\text{m}^3$. A alcance da área de abrangência é variável e também depende do local em que a estação está instalada. Na estação utilizada nesta

pesquisa a área de abrangência é de aproximadamente 300 m, como mostra a FIGURA 20.

As profundidades a que se referem as determinações da umidade são variáveis em função da própria umidade do solo. A profundidade efetiva das observações é determinada através do código *Monte Carlo N-Particle Extended* (MCNPX) definido por PELOWITZ, (2005).

Na FIGURA 28 é evidenciado a variação da profundidade efetiva em função da variação da umidade do solo.

FIGURA 28 – PROFUNDIDADE EFETIVA PELA SONDA COSMOS



FONTE: O autor (2019).

Verifica-se que a profundidade efetiva da sonda COSMOS é inversamente proporcional a umidade do solo, sendo que: quanto maior a umidade, menor a profundidade de alcance.

Os dados provenientes desta sonda foram adotados como valores de referência para a umidade do solo em função de diversos fatores tais como: precisão nominal do equipamento muito superior a precisão das demais sondas; maior rigor nas determinações; dados fornecidos aos usuários passam por controle de qualidade; os dados resultantes são mais representativos da área monitorada que as demais sondas que são pontuais.

3.4 AVALIAÇÃO DAS REFLEXÕES

A avaliação do comportamento das oscilações causadas pelos sinais refletidos no SNR foi efetuada a partir de um arquivo de rastreo (RINEX.o) com duração mínima de 24 horas. O qual contempla todo o comportamento destas interferências nas oscilações, devido ao fato de que as reflexões têm um desempenho cíclico em uma estação estática. Foram avaliados os diferentes sinais GNSS considerando as diferentes direções de passagem dos satélites.

Esta etapa se fez necessária visto que as oscilações no SNR, que são de interesse nesta aplicação, podem estar contaminadas por reflexões provenientes de obstruções, o que acarreta em oscilação que não estejam bem definidas. Para avaliá-las, considerou-se cada combinação entre satélite observado e a respectiva direção do sinal incidente e o tipo de sinal registrado. Nestas avaliações foi priorizado principalmente o Nascer e o Ocaso de cada combinação, ou seja, os ângulos mais próximos ao horizonte da antena, que são aqueles mais sujeitos a recepção de sinais indiretos provenientes do solo.

Através desta avaliação, foi possível identificar as direções que proporcionaram as reflexões sem influência de obstruções, para isso foi utilizado o software RTKPLOT do pacote RTKLIB versão 2.4.2, o qual permite isolar o interferograma descrito pelo SNR para um dado satélite e sinal específico de interesse de um arquivo de observações GNSS.

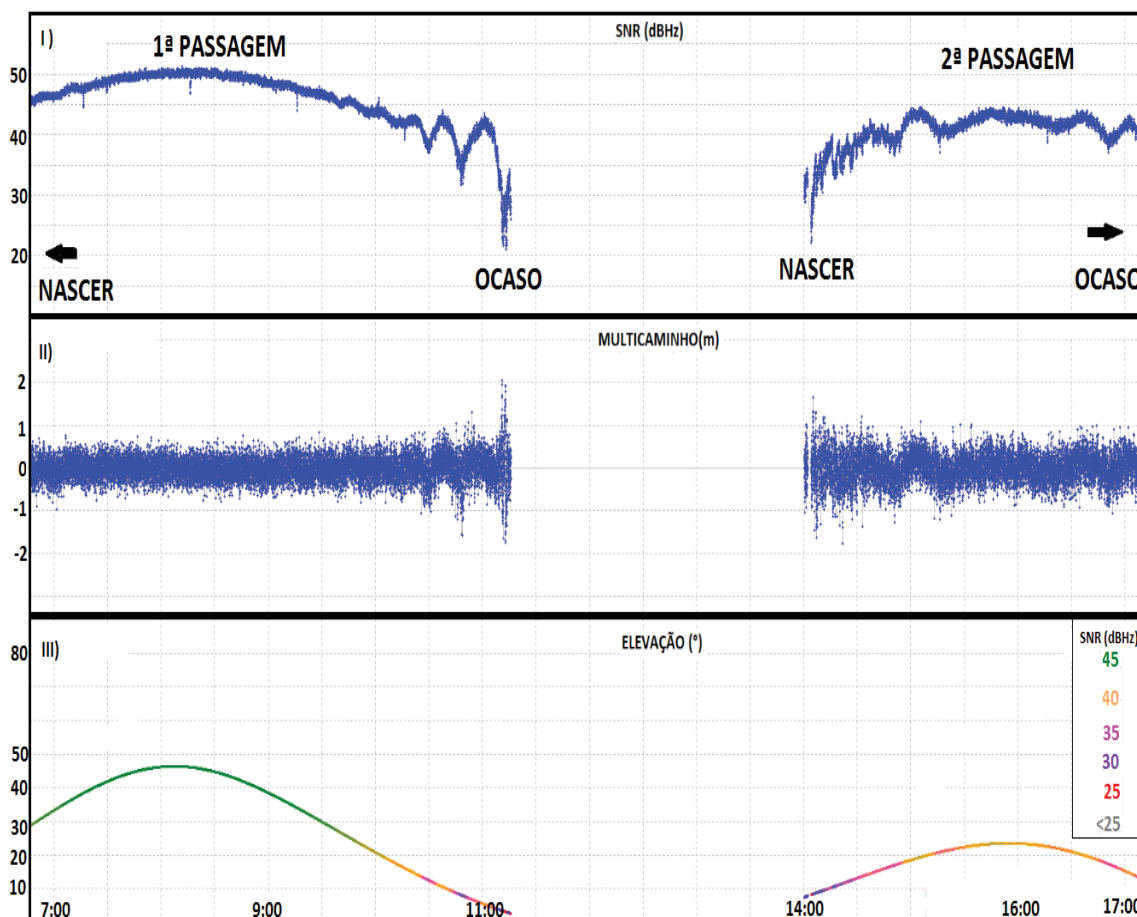
Na FIGURA 29, quadro “I” destaca-se o interferograma SNR (dBHz) pelo sinal L2C (Seção 2.2.1), correspondente às duas passagens do satélite GPS 8 sobre o horizonte da antena GNSS durante 24 horas. Verifica-se também a influência do multicaminho ao longo do rastreo, sendo máxima para satélites com baixa elevação ($\pm 2m$) no ocaso da primeira passagem.

Na primeira passagem (esquerda), as oscilações se mostram bem definidas, ao passo que na segunda passagem isso não ocorre, verifica-se que os ciclos característicos do SRN não estão destacados.

Esta degradação nas oscilações é causada pela influência de obstruções no entorno da estação. No segundo momento, como o satélite fez uma passagem mais baixa em relação ao zênite, tendo ângulo de elevação máximo de aproximadamente 25° , o sinal transmitido esteve mais suscetível às obstruções.

Após serem avaliados todos os sinais, detectou-se que a Leste da estação, do horizonte da antena até aproximadamente 25° de elevação as oscilações SNR foram afetadas por obstruções.

FIGURA 29 – OSCILAÇÕES SNR



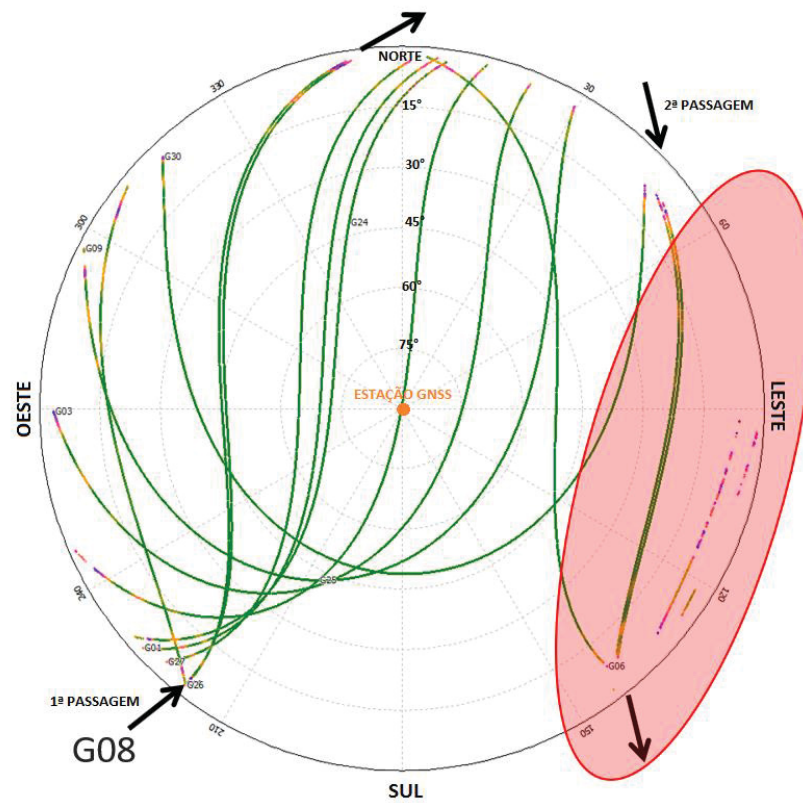
FONTE: O autor (2019).

A FIGURA 30 demonstra as trajetórias dos satélites sobre o horizonte da antena para um período de 24 horas. Destaca-se as duas passagens do G08, bem como, a área em que os sinais foram afetados por obstruções.

Ao comparar a FIGURA 30 com a FIGURA 19, correspondente a vista panorâmica centrada a Leste da estação, pôde-se atestar a influência da plantação de eucaliptos nas oscilações SNR. Esta plantação é detalhada na FIGURA 31.

O conhecimento desta área de obstruções (em termos de azimuth e ângulo de elevação), permitiu que no processamento por meio do algoritmo refletométrico, os sinais provenientes desta região fossem desconsiderados.

FIGURA 30 – TRAJETÓRIAS DOS SATÉLITES



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 31 – VISTA LESTE DA ESTAÇÃO GNSS



FONTE: Adaptado de Nievinski e Sapucci (2014).

3.5 ALGORITMO REFLETOMÉTRICO

O algoritmo refletométrico adotado efetua a determinação de parâmetros que permitem recuperar variáveis relacionadas às superfícies de reflexão através de duas abordagens: um modelo físico direto que simula as observáveis e um modelo estatístico rigoroso, que efetua a inversão de parâmetros a partir dos arquivos de observação GNSS. Este algoritmo dá suporte ao GNSS-MR pois permite a ligação explícita das observações GNSS, características do equipamento e do ambiente (NIEVINSKI, 2013). Com isso, possibilita a distinção entre diferentes efeitos aos quais estas observáveis estão sujeitas. Foram simulados e processados os sinais GS1C, GS2X, do GPS, e RS1C, RS1P, e RS2P do GLONASS, bem como, um sinal médio destes sinais.

3.5.1 Simulações

O modelo físico direto é responsável pela simulação do efeito de multicaminho sobre o SNR. Desta forma, o simulador é utilizado na avaliação da performance teórica do Multicaminho em relação à performance real. Este modelo é do tipo polarimétrico conforme declarado por Nievinski e Larson (2013), pois considera as duas polarizações, RHCP e LHCP dos sinais GNSS.

A formulação deste modelo é construída a partir de uma abordagem física para definição da réplica de sinais GNSS diretos e de sinais refletidos, a partir dos quais se determinam quantidades interferométricas. Para isto, o modelo simula situações reais e considera a interação dos sinais refletidos com o meio, ponderando: as propriedades geométricas e dielétricas da superfície; características do sistema de medida (padrões de ganho e fase da antena, modulação do sinal e os algoritmos de rastreio dos receptores), e características do levantamento (altura e orientação da antena).

De acordo com Nievinski (2013), neste modelo explora-se os efeitos da variação da coerência dos sinais; a modulação do código impresso nas ondas portadoras; as respostas da antena em termos de seu comprimento efetivo, o qual dita como o campo elétrico de entrada é convertido em corrente elétrica; o campo

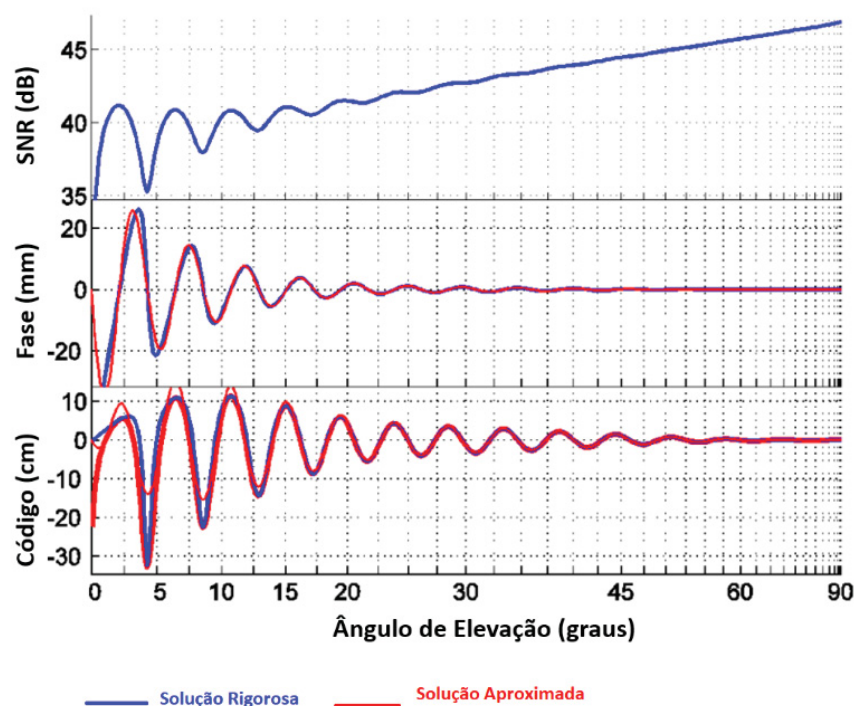
elétrico direto e o refletido; e por fim, a densidade espectral de potência do ruído, por meio do qual determina-se efetivamente o SNR simulado.

Para isto, efetuou-se as configurações do algoritmo referente ao modelo direto em Matlab, ponderando as informações aqui citadas que, grosso modo, envolvem: as condições de observação dos satélites; do sistema de referência; informações acerca da propagação, reflexão e registro dos sinais pela antena GNSS. Estas configurações em conjunto com parâmetros físicos a elas relacionados, são os dados de entrada do modelo.

Os parâmetros envolvidos estão influenciados por diversos efeitos físicos, assim, a definição exata de cada um destes efeitos é inviável. Portanto, de acordo com Nievinski (2013), são adotados valores nominais para os parâmetros físicos os quais, para diversas aplicações já estão adicionados em bibliotecas do referido algoritmo. Nesse âmbito, tem-se vieses para cada parâmetro determinado, os quais representam uma tendência associada aos parâmetros nominais adotados, dentre estes: viés da altura da antena; viés da potência e da fase interferométricas, potência e da fase diretas, e vieses dos coeficientes polinomiais.

A FIGURA 32 indica as curvas resultantes de uma simulação

FIGURA 32 – OBSERVÁVEIS SIMULADAS



FONTE: Adaptado de Nievinski (2013).

3.5.2 Inversão

No processo de inversão são estimados os parâmetros que incluem: o viés da potência; altura da antena; erro médio quadrático da altura da superfície de reflexão; e a permissividade real e imaginária. Esta etapa envolve o ajustamento por mínimos quadrados não linear entre as observações simuladas e as medidas. No processo de inversão, tem-se como dados de entrada:

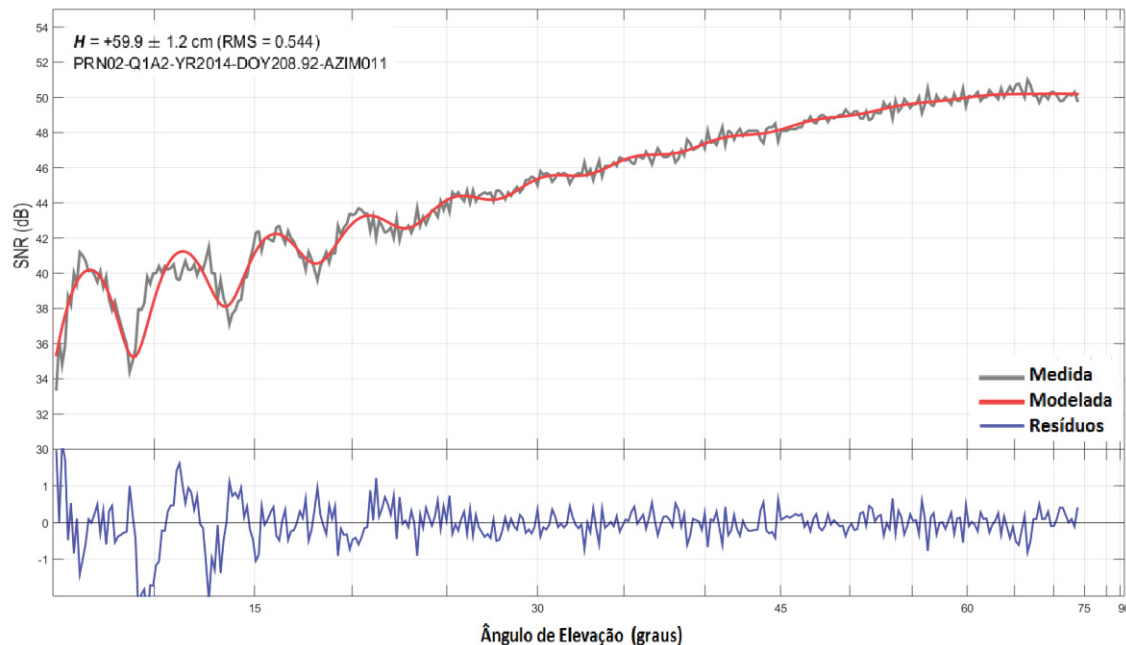
- Efemérides precisas, as quais são baixadas automaticamente do IGS (*International GNSS Service*), e correspondem a arquivos diários compactados no formato sp3.z.
- Dados SNR medidos, registrados nos dados GNSS (formato RINEX.o).
- Dados SNR simulados provenientes do modelo físico direto.

Na rotina correspondente a inversão indica-se: informações acerca da estação; sistema de referência; tempo de duração das seções de processamento (foi optado por efetuar o processamento a partir de dados referentes a uma semana); armazenamento dos dados; da plotagem dos resultados da inversão; configuração dos dados de entrada; órbitas; limites de elevação; características dos parâmetros de saída, unidades, aspectos e composição da superfície e demais condições relacionadas a parametrização.

Como resultados da inversão serão determinados os parâmetros incógnitos, os quais são comparados internamente com os parâmetros gerados pelo modelo físico direto, bem como, os respectivos vieses e incertezas dos parâmetros, devendo-se estimar inevitavelmente Amplitude, Frequência, e Fase.

Na FIGURA 33 apresenta-se a sobreposição de dados SNR, os quais são elaborados para cada satélite, sinal específico e sentido da órbita (ascendente e descendente). Nesta figura tem-se os dados provenientes do satélite GPS PRN02, com o SNR simulado, o medido, e os respectivos resíduos para um satélite com orbita ascendente.

FIGURA 33 – OBSERVÁVEIS SIMULADAS E MEDIDAS



FONTE: O autor (2019).

Os referidos parâmetros são resultantes do ajustamento da curva composta de tendência senoidal amortecida, as quais são aproximadas com base em diversos fatores como o modelo e altura da antena GNSS, da composição e rugosidade da superfície refletora, entre outros.

Na inversão foram estimados os vieses dos parâmetros os quais provêm das deficiências do modelo físico. Os resíduos obtidos entre os parâmetros simulados e provenientes das observações foram avaliados de maneira a garantir a qualidade da inversão.

3.5.3 Pós Processamento

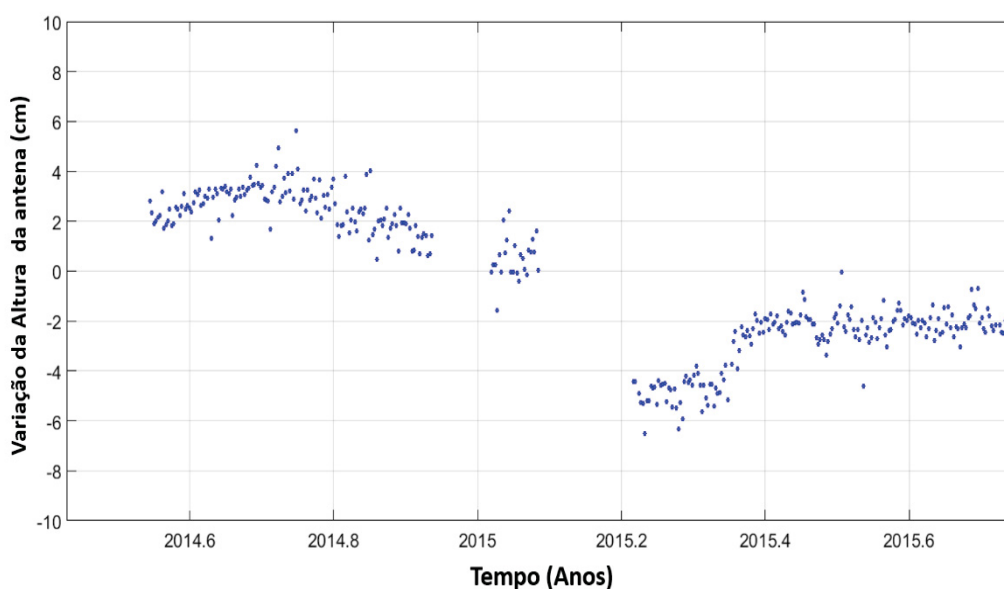
A partir da avaliação dos dados de inversão iniciou-se o processo de pós-processamento. Nesta etapa não se trabalha mais com dados SNR, apenas com os parâmetros estimados e refinados, os quais passam por avaliação dos parâmetros obtidos e controle de qualidade.

Conforme Nievinski (2013), o viés da potência do sinal direto (P_d) é definido por meio de um polinômio de segundo grau. O coeficiente polinomial de grau 0 (termo constante) é a média; o de grau 1 a inclinação da curva de ajuste; e o de grau dois é

a curvatura da tendência. O viés da potência interferométrica é basicamente a amplitude, que também é definido por polinômio. Visto que a amplitude não é constante e sim amortecida, não basta se ter uma amplitude de grau zero, mas um polinômio de grau 1, o qual é satisfatório.

Através da conversão do viés de fase linearizado pode-se estimar a altura da antena (em metros). O resultado do ajustamento da curva para cada nascer e oco de um satélite resulta em uma altura variável, assim para cada conjunto de dados processados se tem uma respectiva altura da antena. A partir destas alturas uma altura fixa média é definida sendo ela mais realista para o período em estudo. Na FIGURA 34 apresenta-se a variação na altura da antena ao longo do tempo de monitoramento GNSS. Percebe-se que a amplitude de variação da altura está entre ± 6 cm.

FIGURA 34 – VARIAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA



FONTE: O autor (2019).

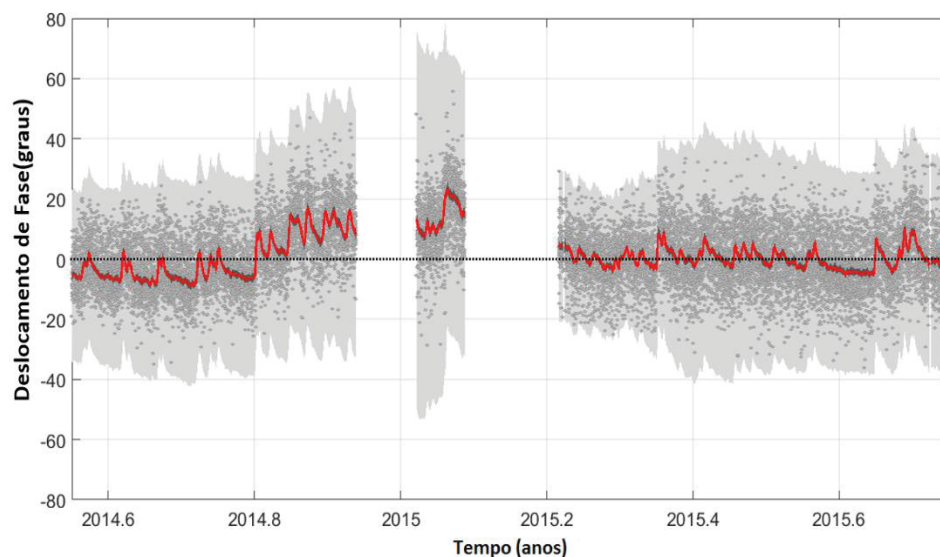
A partir desses resultados efetuaram-se manipulações através de avaliações dos ajustes, com a inserção de injunções e eliminação de *outliers*. A altura média da antena foi definida considerando-se as variações da mesma ao longo do monitoramento (FIGURA 35). Em seguida esta altura fixa média foi injuncionada nos parâmetros estimados. Com isto, pôde-se melhorar a precisão da fase pois ela é muito correlacionada com a altura da antena. Sendo a fase a variável de interesse nesta

aplicação, ou seja, a grandeza com maior correlação com variações na umidade do solo, melhora-se as estimativas da umidade quando se tem valores de fase mais precisos.

A injunção foi inserida a partir da Matriz de Variância e Covariância MVC (8x8) referente aos 8 parâmetros empíricos resultantes da inversão. A diagonal principal desta matriz contém as variâncias destes parâmetros, a partir das quais obteve-se as respectivas precisões. Os dois primeiros elementos da diagonal principal, são relacionados à fase, sendo estes o deslocamento de fase e a taxa de variação da fase. Por estes parâmetros serem muito correlacionados, eles degradam a precisão dos resultados, por isto são empregados na injunção. Cria-se uma nova MVC (2x2) a partir destes valores e um novo processamento é efetuado.

Por fim, tem-se o viés da fase interferométrica, também definido por um polinômio. O coeficiente de grau zero (φ_0) é o deslocamento de fase que consiste numa constante dada em função do padrão de fase, da composição média e da inclinação da superfície; o de grau 1 (φ_1) é a taxa de variação da fase. Na FIGURA 35 o comportamento do deslocamento de fase ao longo do período de monitoramento é indicado.

FIGURA 35 – DESLOCAMENTO DE FASE



FONTE: O autor (2019).

3.6 CONVERSÃO EM UMIDADE DO SOLO

Nesta etapa foi definido o relacionamento entre os resultados da fase refletométrica com os valores de umidade do solo medidos por sondas. Determinou-se a curva de calibração que relacionou os parâmetros encontrados nos processamentos com as observações da umidade do solo.

Considerando que a determinação da umidade foi efetuada por diferentes sondas (3 sondas PR1 e a COSMOS) avaliou-se aquela que apresentou a melhor correlação com os dados da Refletometria.

Desta forma, a calibração da fase reflectométrica resultante do processamento foi definida empiricamente, através da correlação com a sonda COSMOS por meio de um ajuste polinomial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação do desempenho do GNSS-MR na determinação da umidade do solo foi efetuada principalmente através da comparação e avaliação das séries temporais obtidas com esta técnica através de diferentes sinais GNSS, frente a séries obtidas com observações efetuadas pelas sondas de capacitância PR1 e uma sonda COSMOS, bem como em relação a eventos meteorológicos.

Para dar embasamento nestas investigações, avaliou-se o desempenho de destas sondas, bem como, a performance do GNSS-MR frente a uma diferente amostragem de dados GNSS (horário e diário).

4.1 DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS PR1

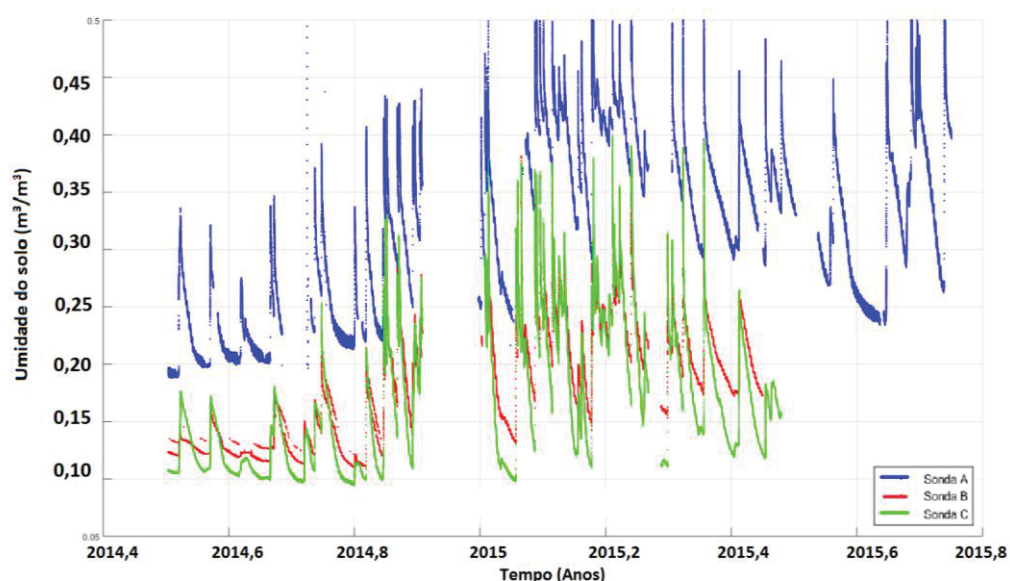
Conforme descrito na Seção 3.3.2, este tipo de sonda efetua a determinação da umidade do solo em 6 profundidades. Pela FIGURA 26 atestou-se que o comportamento da umidade é variável em função da profundidade, o que foi verificado em todas as três sondas deste modelo. A avaliação dos resultados obtidos por estas sondas contribui na avaliação da comparação entre as séries temporais de umidade do solo.

Pelo comportamento desta curva verifica-se que a ocorrência de picos está ligada aos episódios de precipitação. Após cada um destes episódios percebe-se o decréscimo da umidade atingindo estabilidade ao longo do tempo, até a ocorrência de um novo pico de precipitação e assim sucessivamente.

Silva Júnior et al. (2013), efetuaram uma avaliação da sonda PR1 na qual seus resultados foram comparados com o método gravimétrico (Seção 2.1.1), que é método de referência na determinação de umidade do solo. Na referida pesquisa concluiu-se que o maior coeficiente de correlação foi de 0,793, e ocorreu na profundidade de 10 cm, e em seguida na de 20 cm, com o coeficiente 0,736. Para as demais profundidades obteve-se baixo grau de correlação.

Larson et al. (2010), indicam que a umidade do solo determinada através do GNSS-R está relacionada aproximadamente a profundidade de 5 cm (entre 2,5 e 7,5 cm). Com base nestes fatores, utilizou-se apenas os dados provenientes do sensor a 10 cm de profundidade para efetuar as comparações. Na FIGURA 36 apresenta-se as séries de dados referentes as sondas PR1 A, B e C.

FIGURA 36 – UMIDADE DO SOLO ATRAVÉS DAS SONDAS PR1



FONTE: O autor (2019).

A curva descrita pela sonda A (azul) se mantém discrepante durante todo o monitoramento, com um deslocamento de aproximadamente 100% no valor da umidade em relação as sondas B e C. Embora evidencie-se que este equipamento, que proporciona medidas pontuais, e que ele fora instalado a aproximadamente 40 m das sondas B e C, a variabilidade dos dados entre estas foi muito acentuada, destacando-se nos picos.

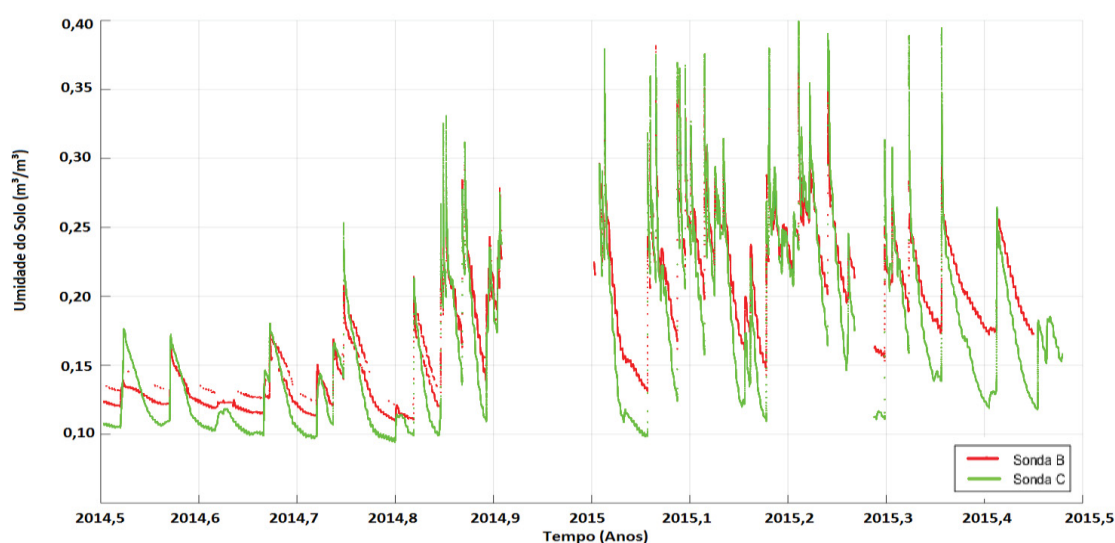
Percebe-se que existe a concordância temporal nos picos das três curvas, contudo, eles são mais acentuados nos dados da sonda A, o que indica maior sensibilidade a variações na permissividade do solo em relação às demais. Isso foi evidenciado ao se efetuar uma avaliação das discrepâncias entre as séries de dados, PR1, verificando-se que as discrepâncias entre a sonda A e as demais não se mantêm constantes ao longo do tempo, o que indicaria uma questão sistemática.

Conforme apresentado na seção 3.3.2, referente aos dados das sondas PR1, os resultados obtidos com a sonda A apresentaram ocorrência significativa de dados espúrios, valores não-numéricos e inconsistências. Considerando que as sondas PR1 são de mesmo modelo, pode-se supor que estas diferenças podem ser advindas: da composição do solo, destacando-se as limitações destes equipamentos quanto a

salinidade e óxidos de ferro; de falha instrumental; ou da instalação do equipamento. Estes fatores corroboraram com a não utilização dos dados provenientes da sonda A.

As curvas de umidade do solo referentes as sondas B e C tiveram um comportamento muito semelhante, sendo que na ocorrência dos picos, a sonda C apresenta maior variabilidade que a sonda B. Na FIGURA 37 apresenta-se as séries temporais definidas pelas sondas B e C.

FIGURA 37 – SÉRIES TEMPORAIS PR1



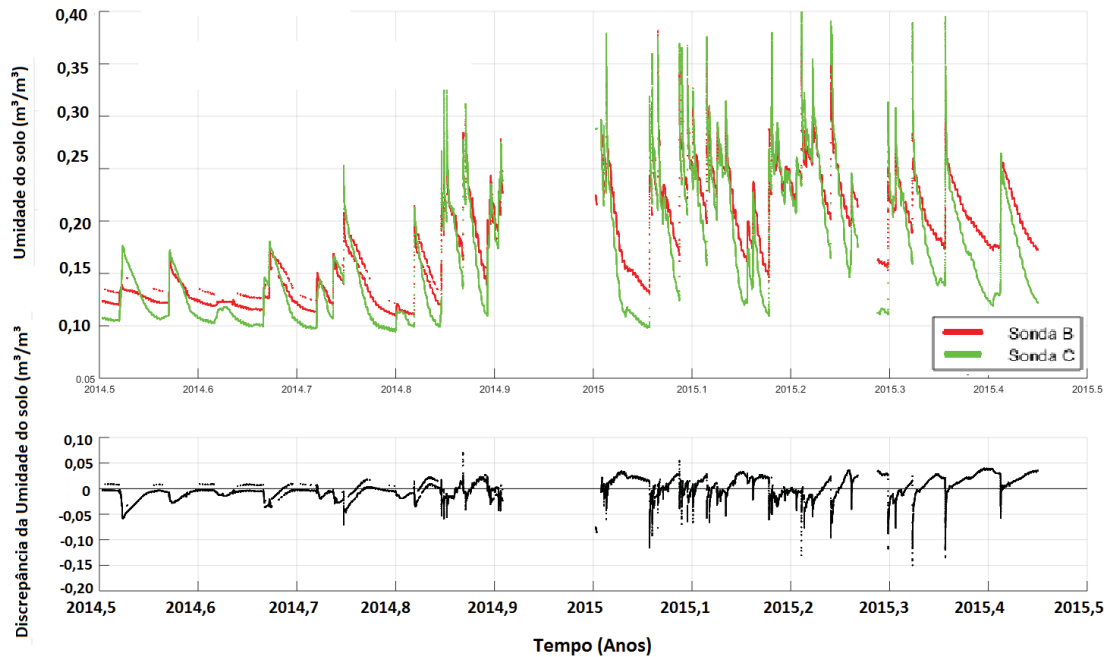
FONTE: O autor (2019).

Efetuuou-se o cálculo das discrepâncias entre estas séries relativas as sondas B e C (FIGURA 38). Os valores de discrepância foram em torno de $\pm 0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ao longo do período, sendo estes inferiores a precisão nominal do equipamento ($0,06 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Nos picos de umidade, devido a maior sensibilidade da sonda C frente a variações de umidade, verificou-se as maiores discrepâncias.

Através da FIGURA 39 destaca-se as discrepâncias entre as sondas em função da umidade do solo. Verificou-se que existe uma tendência de aumento da discrepância com o aumento da umidade. Quando se registrou o valor máximo de umidade, próximo de $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ obteve-se a maior discrepância, que foi de $-0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Considerando que estas discrepâncias se mostraram valores predominantemente negativos com o aumento da umidade, isso indica que uma das sondas se mostrou mais sensível às variações da permissividade, que é a propriedade do solo explorada nestas sondas.

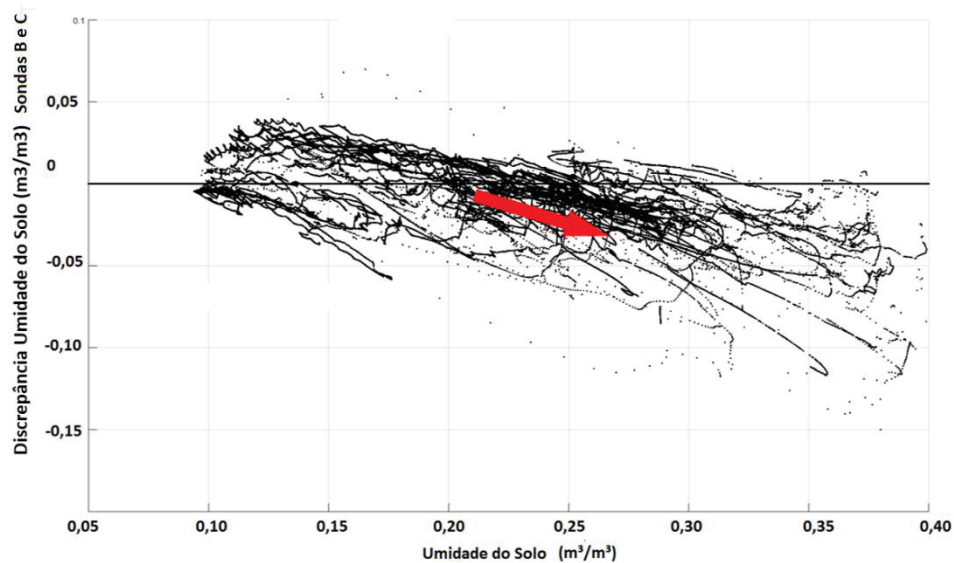
Sugere-se que esta sensibilidade está relacionada uma questão instrumental tendo em vista que estas sondas foram posicionadas com cerca de 3 m de afastamento uma da outra, portanto suscetíveis aos mesmos efeitos, e também pelo fato de que as discrepâncias são mais significativas nos picos de umidade posteriores a precipitações.

FIGURA 38 – DISCREPÂNCIA ENTRE AS SÉRIES DAS SONDAS B E C



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 39 – DISCREPÂNCIA DAS SONDAS B E C EM FUNÇÃO DA UMIDADE

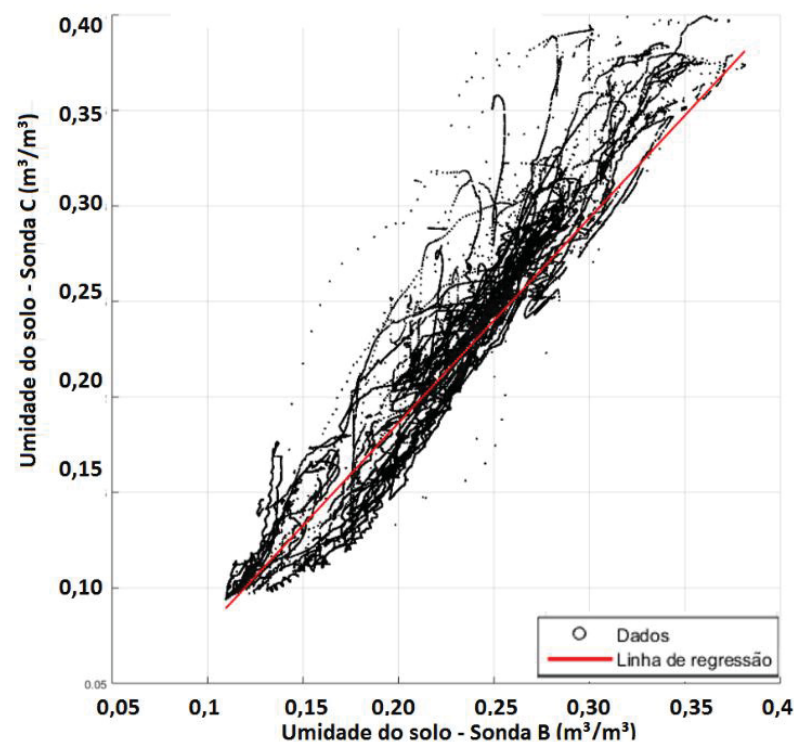


FONTE: O autor (2019).

Apesar destas diferenças obtidas entre as sondas de mesmo modelo, elas podem ser consideradas não significativas, tendo em vista que são muito inferiores a precisão nominal do equipamento. Além disto, os dados das sondas B e C são altamente correlacionados. O coeficiente de correlação entre estas foi de 0,9458, que equivale a correlação de 95%. Isto é evidenciado pela concentração de dados ao longo da linha de regressão (vermelho), apresentada na FIGURA 40, referente a dispersão dos dados entre as duas sondas PR1 adotadas.

Calculou-se a raiz do erro médio quadrático (RMSE), do inglês *Root Mean Square Error*, sendo de $0,0190 \text{ m}^3/\text{m}^3$, o qual é inferior a precisão nominal do equipamento, que é de $0,06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Seção 3.2.2).

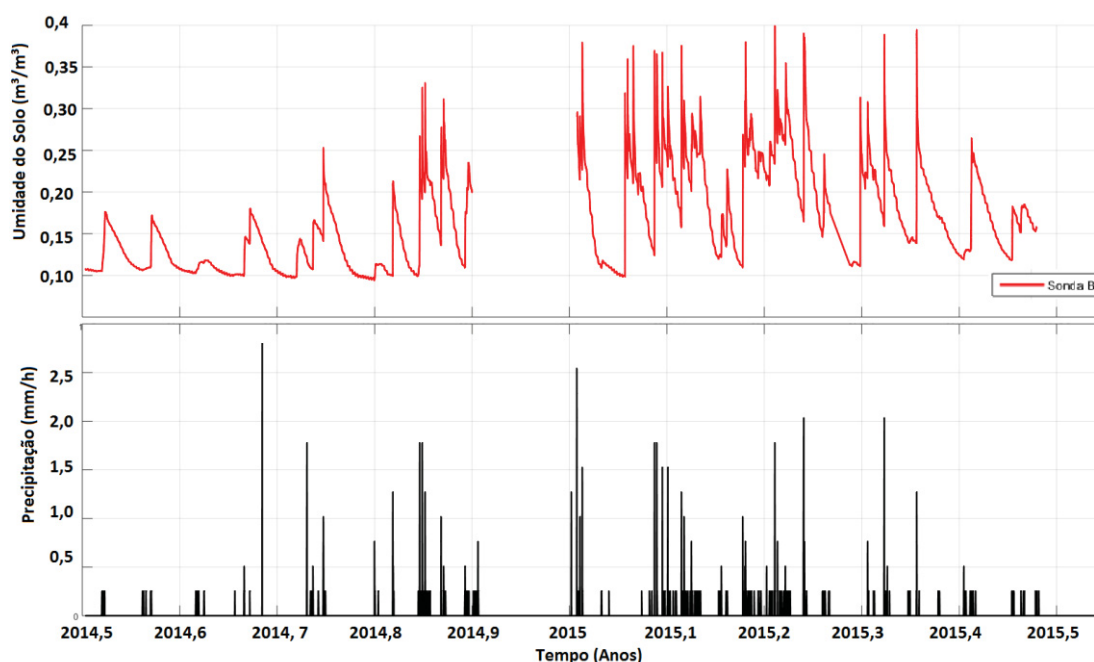
FIGURA 40 – DISPERSÃO ENTRE SONDAS PR1



FONTE: O autor (2019).

A FIGURA 41 apresenta a relação entre os dados obtidos com a sonda B e os eventos de precipitação. Através desta figura averiguou-se as respostas da sonda B frente a estes eventos. Os dados de precipitação foram coletados por meio de um pluviômetro instalado no local.

FIGURA 41 – COMPARAÇÃO DA SONDA B X PRECIPITAÇÃO



FONTE: O autor (2019).

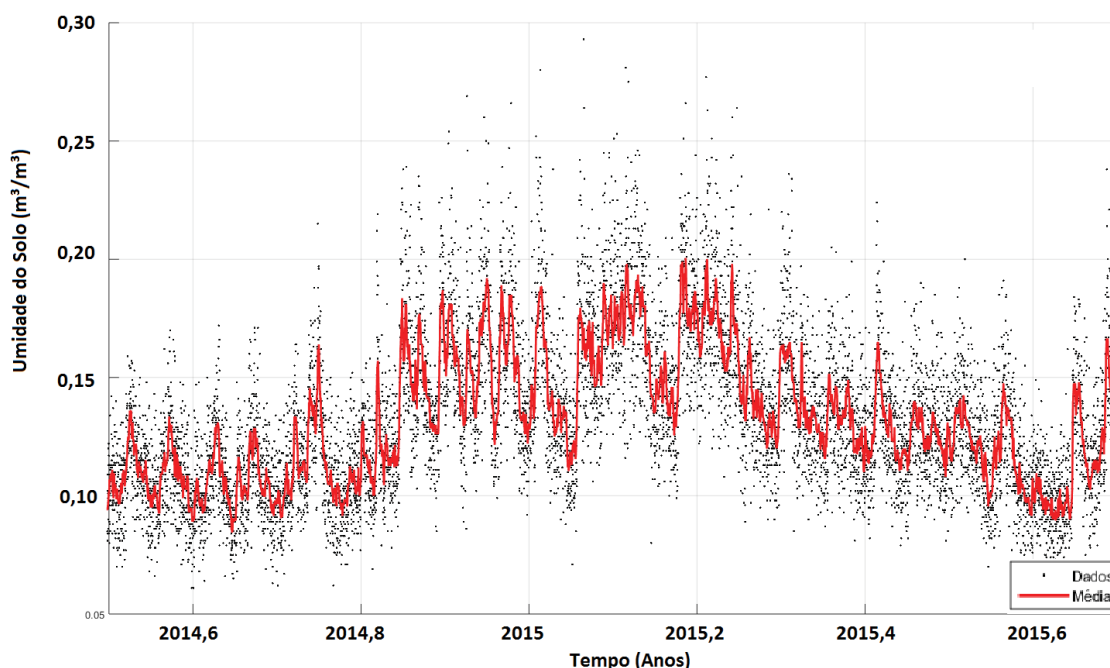
Verifica-se que há concordância entre precipitação e picos de umidade descritos por esta sonda. Contudo, o pico de umidade registrado, se dá com um atraso natural, visto que, no momento em que ocorre a precipitação, esta água pode ser imediatamente filtrada pelo solo sem que ela seja registrada pelo sensor; ou então pode ficar retida na primeira camada do solo até que a força gravitacional faça com que ela se infiltre atingindo o campo eletromagnético do sensor.

Deve-se destacado que no principal evento de precipitação, ocorrido próximo à época 2014,7, não se tem uma correspondência direta com um pico de umidade. Sugere-se que esta situação pode ter ocorrido em função de que no período anterior a este evento os níveis de precipitação foram todos baixos, inferiores a 0,5 mm/h. Destaca-se ainda que esta situação ocorreu também pelas séries temporais determinadas pelos demais equipamentos (GNSS e COSMOS).

4.2 SÉRIE TEMPORAL DA SONDA COSMOS

Devido a variabilidade dos dados obtidos com a sonda COSMOS efetuou-se o cálculo de uma série de dados representativa dos valores medidos a partir do cálculo de uma média móvel dos dados (FIGURA 42).

FIGURA 42 – SÉRIE TEMPORAL SONDA COSMOS



FONTE: O autor (2019).

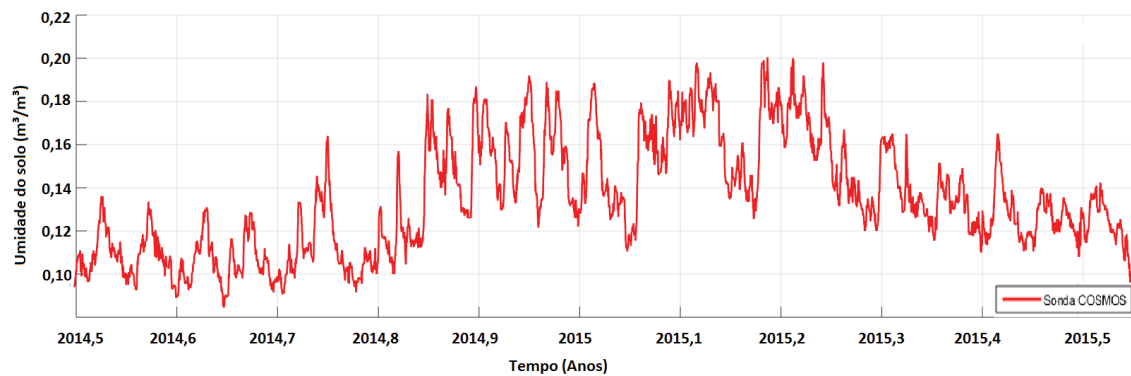
Embora a sonda COSMOS apresente variabilidade dos resultados, o que é esperado, tendo em vista sua área de abrangência, ela apresenta vantagens quando comparada com as sondas PR1 como: melhor precisão; a área de abrangência; e não ser tão sensível a variações na composição do solo.

Evidentemente, esta sonda possui limitações quando existirem elementos na área de abrangência que possam ser potenciais redutores da intensidade de nêutrons que não a umidade do solo. Como é o caso de vegetação, ou mesmo cursos d'água. Na calibração da sonda de nêutrons estes elementos podem ser modelados, contudo, podem proporcionar vieses nos resultados no caso de vegetação em crescimento ou cursos d'água efêmeros. Nestes casos faz-se necessário efetuar uma calibração periodicamente.

Concernente ao desempenho entre a COSMOS e as sondas PR1, Mwale et al. (2005) efetuaram estudos onde obtiveram coeficiente de correlação 0,7 entre uma sonda de nêutrons e uma sonda PR1.

Na FIGURA 43 indica-se a série temporal de umidade do solo definida pela média móvel dos dados da sonda COSMOS.

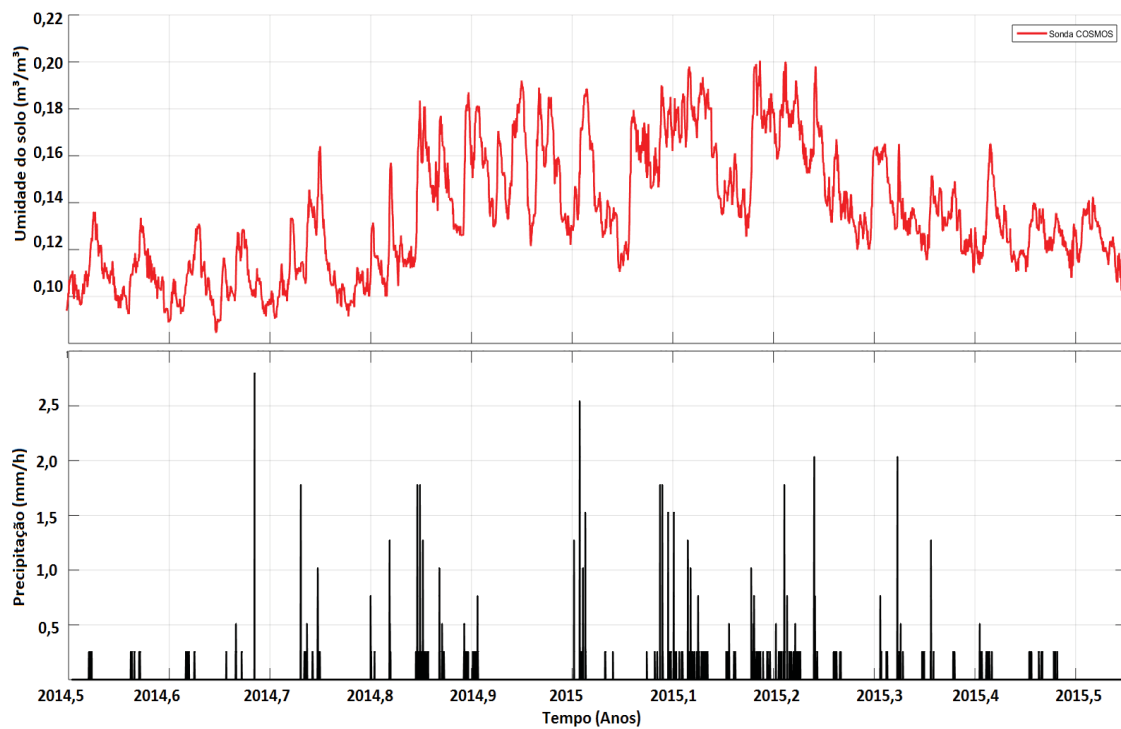
FIGURA 43 – SÉRIE TEMPORAL COSMOS



FONTE: O autor (2019).

Esta série de temporal foi comparada com dados de precipitação (FIGURA 44). Verifica-se que existe a correspondência entre precipitação e os picos.

FIGURA 44 – SÉRIE TEMPORAL DA SONDA COSMOS X PRECIPITAÇÃO

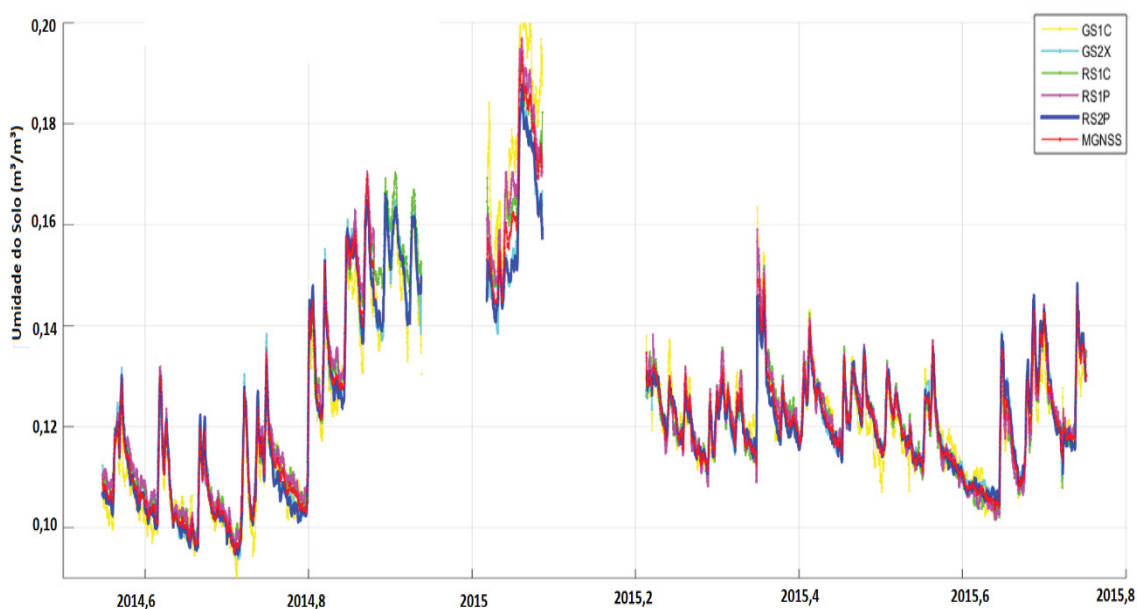


FONTE: O autor (2019).

4.3 SÉRIES TEMPORAIS GNSS-MR

Como resultado dos processamentos efetuados via algoritmo de refletometria, obteve-se séries de dados da fase refletométrica para cada sinal GNSS utilizado. As séries de umidade do solo para cada um destes sinais foram geradas a partir da curva de calibração que relacionou a fase refletométrica utilizando-se neste processo os dados da sonda COSMOS. Na FIGURA 45 as séries GNSS-MR para cada sinal adotado são indicadas.

FIGURA 45 – SÉRIES TEMPORAIS GNSS-MR VIA DIFERENTES SINAIS GNSS



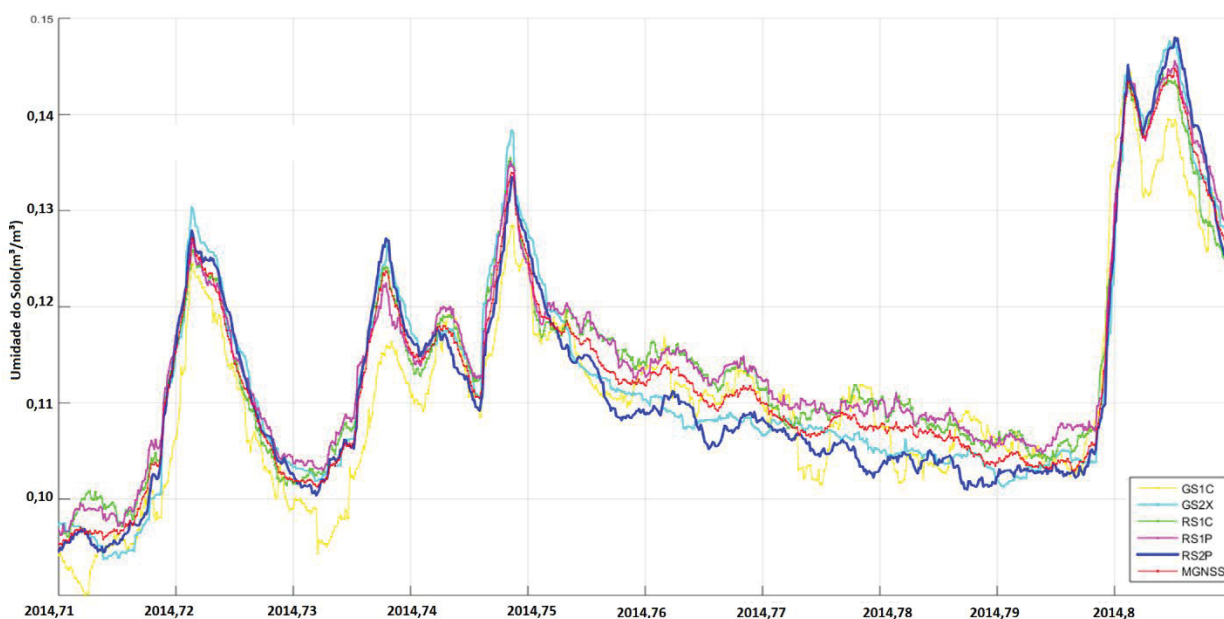
FONTE: O autor (2019).

Verifica-se que a umidade do solo determinada por GNSS-MR foi muito semelhante para todos os sinais. Pode-se perceber a ausência de dados no mês de dezembro de 2014, que, conforme abordado anteriormente (seção 3.3.2.), ocorreu por questões logísticas, o que afetou de igual forma o registro de dados pelas sondas PR1. Contudo, nos dados GNSS ocorreu um segundo imprevisto que acarretou em uma segunda falta de dados, ocorrida entre os meses de fevereiro e março de 2015 (2015,1 a 2015,2).

Na FIGURA 46 detalha-se os primeiros meses do monitoramento nos quais pode-se perceber as variações nas séries de umidade do solo em função do sinal

adotado. Percebe-se que, diferentemente do que ocorreu na comparação das séries obtidas pelas sondas PR1, nas quais as maiores discrepâncias foram observadas nos picos de umidade, as maiores discrepâncias entre os sinais se dão nos vales, que representam períodos no qual o solo estava menos úmido.

FIGURA 46 – DETALHE SÉRIES TEMPORAIS GNSS-MR



FONTE: O autor (2019).

Embora existam estas diferenças elas podem ser consideradas não significativas neste estudo pelo fato de que não foram observadas discrepâncias entre os sinais maiores que $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ que é a precisão nominal do equipamento mais preciso (Sonda COSMOS).

4.4 AVALIAÇÃO DA AMOSTRAGEM DOS DADOS GNSS

A fim de se avaliar a influência da amostragem de dados GNSS na definição das séries temporais foi efetuado efetuou-se o processamento GNSS-MR de dois arquivos do sinal RS2P com diferentes amostragens de SNR, sendo usados um arquivo com valores de SNR diário e outro arquivo com registro SNR horário. As séries temporais resultantes destes dois processamentos foram comparadas. Na TABELA 1 são apresentados os coeficientes de correlação em cada caso.

TABELA 1 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO

AMOSTRAGEM	GNSS x COSMOS	GNSS x SONDA B	GNSS x SONDA C
HORÁRIA	0,7336	0,5525	0,5243
DIÁRIA	0,7196	0,5319	0,5113

FONTE: O autor (2018).

Apurou-se que o aumento da amostragem de valores SNR em um arquivo proporcionou melhores resultados, o que é destacado pelo aumento na correlação de 0,7196 para 0,7336 no melhor cenário.

A questão da amostragem dos dados é importante em se tratando de aplicações que envolvam automação, ou então como neste caso, grande volume de dados, pois influem no tempo de processamento e capacidade de memória.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE GNSS-MR E SONDAS

A comparação das séries temporais foi efetuada de maneira a avaliar os resultados GNSS-MR frente aos resultados obtidos com as sondas de capacitância e a sonda de nêutrons. Para isto, efetuou-se a análise da correlação entre cada série temporal obtida por GNSS-MR via diferentes sinais e as séries temporais obtidas pelas três sondas (B, C e COSMOS), bem como os respectivos Erros Médios Quadráticos (RMSE). Para isto, foram criadas rotinas em Matlab. Na TABELA 2 estão indicados os coeficientes de correlação obtidos entre as séries.

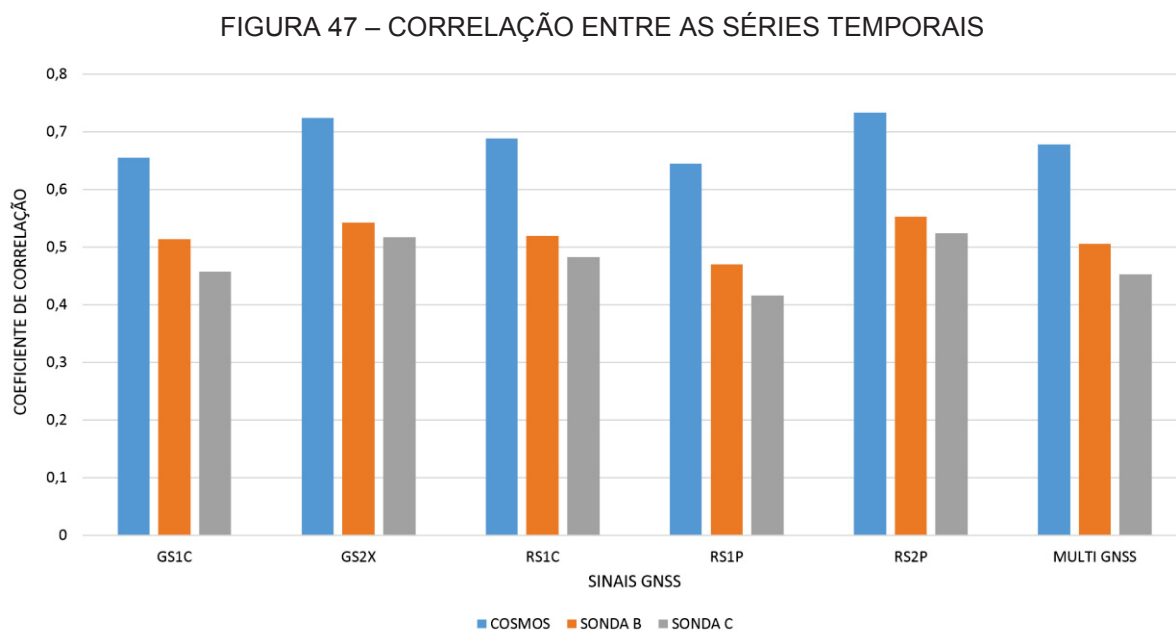
TABELA 2 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS SÉRIES

SINAL GNSS	COSMOS	SONDA B	SONDA C
GS1C	0,6547	0,5135	0,5472
GS2X	0,7242	0,5420	0,5168
RS1C	0,6886	0,5198	0,4820
RS1P	0,6450	0,4701	0,4156
RS2P	0,7336	0,5525	0,5243
MGNSS	0,6778	0,5054	0,4523

FONTE: O autor (2018).

As combinações que proporcionaram os dois maiores coeficientes de correlação, portanto, melhores correlações foram 0,7336 e 0,7242, entre a sonda COSMOS e o sinal RS2P, seguido da sonda COSMOS e sinal GS2X, respectivamente. As piores correlações tiveram coeficiente 0,4156 e 0,4523, obtidas entre a sonda C e o sinal RS1P, e sonda C e o sinal médio gerado, respectivamente.

Na FIGURA 47, estes valores de correlação são representados de maneira gráfica. Demonstra-se que o padrão de correlação é dado principalmente em função da sonda avaliada, não ocorrendo variação expressiva em função do sinal GNSS adotado no processamento. É notório que as maiores correlações foram com a sonda COSMOS (Azul), seguida da sonda B (Laranja), por fim, a sonda C (Cinza).



FONTE: O autor (2019).

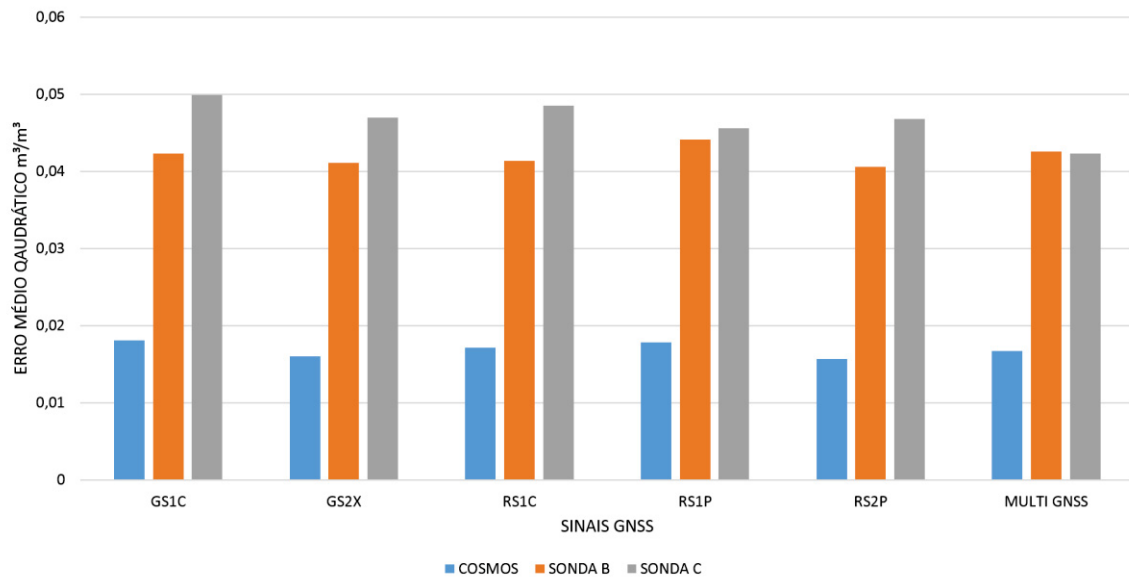
Na TABELA 3 indica-se os valores do RMSE. Estes valores são indicados, sendo o maior valor (pior caso), obtido entre o sinal GS1C com a sonda C ($0,0499\text{m}^3/\text{m}^3$), sendo este valor menor que a precisão nominal das sondas PR1. O menor valor (melhor caso), foi entre o sinal RS2P e a sonda COSMOS, com $0,0157\text{m}^3/\text{m}^3$. Na FIGURA 48 estes valores de RMSE são exibidos de maneira gráfica.

TABELA 3 – RAIZ DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – RMSE

SINAL GNSS	COSMOS (m^3/m^3)	SONDA B (m^3/m^3)	SONDA C (m^3/m^3)
GS1C	0,0181	0,0423	0,0499
GS2X	0,0160	0,0411	0,0470
RS1C	0,0171	0,0414	0,0485
RS1P	0,0178	0,0441	0,0456
RS2P	0,0157	0,0406	0,0468
MGNSS	0,0167	0,0426	0,0423

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 48 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO ENTRE AS SÉRIES TEMPORAIS

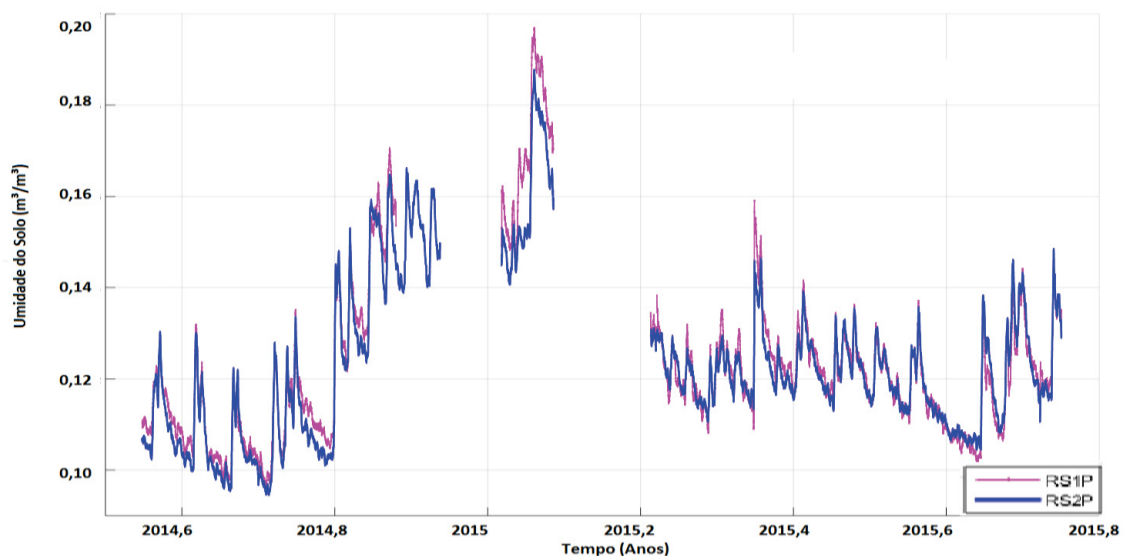


FONTE: O autor (2019).

4.6 RESULTADOS EM EVIDÊNCIA

Nesta seção são explanadas as avaliações inerentes as séries de umidade pelo GNSS-MR que obtiveram a maior e a menor correlação com as sondas, sendo estes o sinal RS2P e o RS1P, ambos do GLONASS. Na FIGURA 49 estas séries temporais são destacadas. Efetuou-se a avaliação da dispersão, discrepância e o controle de qualidade e inferências estatísticas acerca destas séries temporais.

FIGURA 49 – SÉRIES DE UMIDADE DO SOLO GNSS-MR (RS2P e RS1P)

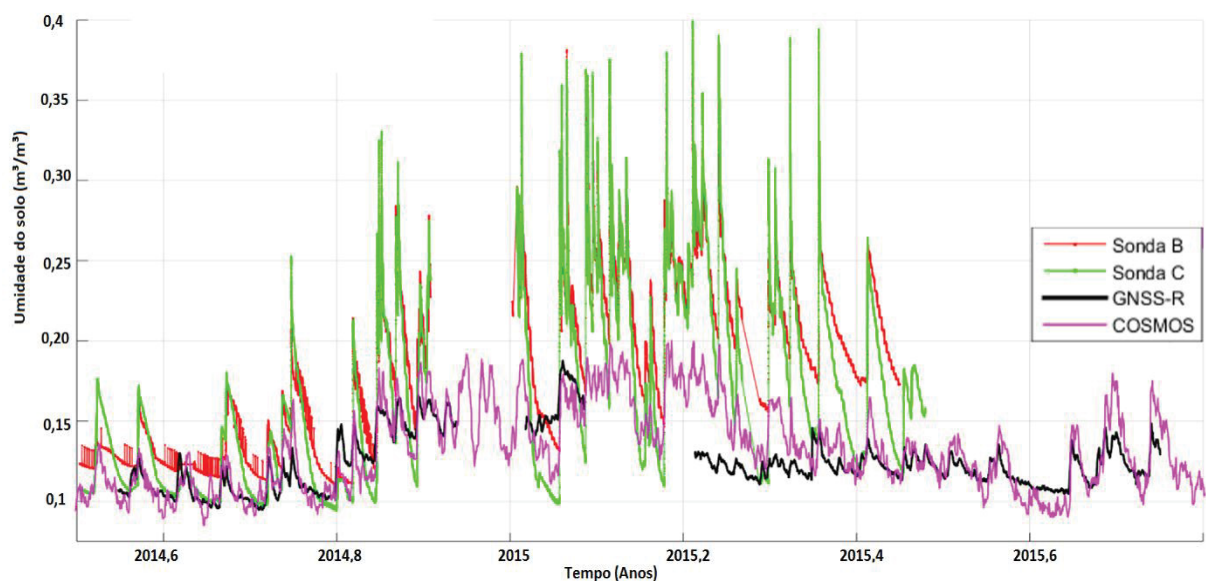


FONTE: O autor (2019).

4.6.1 Sinal RS2P

O sinal RS2P corresponde ao chamado sinal P da L2, do GLONASS. Através deste sinal obteve-se a melhor série temporal de umidade, ou seja, aquela com maior correlação com a sonda COSMOS. Na FIGURA 50 é apresentado o conjunto de séries temporais obtido através dos diferentes métodos.

FIGURA 50 – SÉRIES TEMPORAIS DE UMIDADE DO SOLO (RS2P)



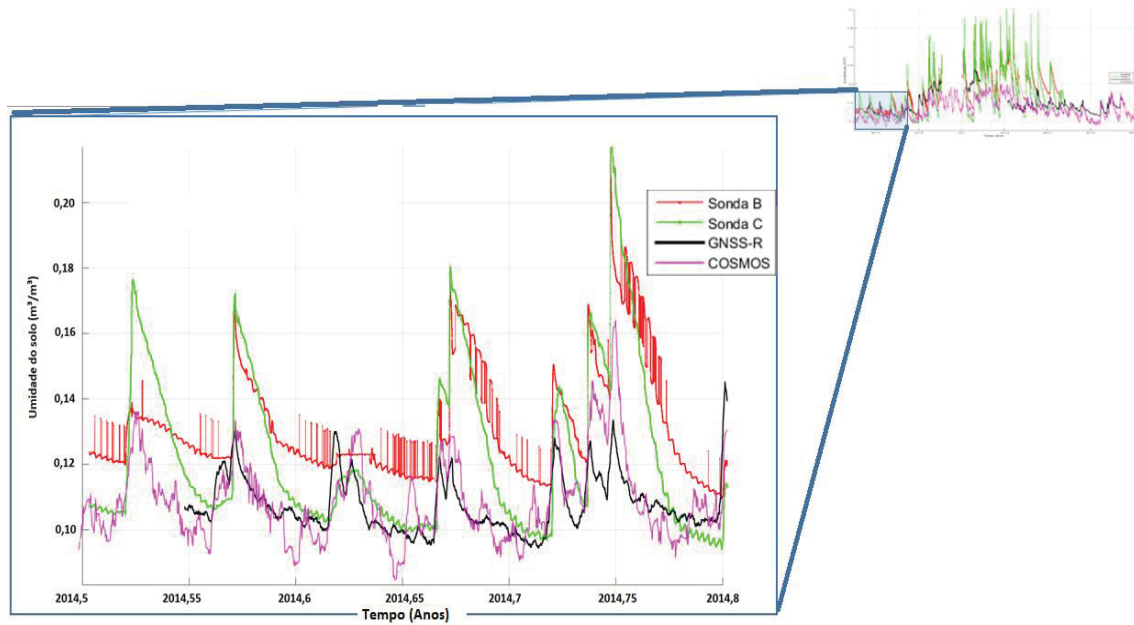
FONTE: O autor (2019).

A ocorrência dos picos ocorre integralmente havendo concordância temporal entre os diferentes instrumentos. Verifica-se que os picos são bem mais acentuados nas sondas PR1.

Contudo, pode-se sugerir que até certo valor da umidade todos os métodos teriam um comportamento muito próximo. Quando este limiar de umidade é ultrapassado (entre 0,15 e 0,20 m³/m³), a sensibilidade das PR1 aumenta significativamente, com isso, os picos tornam-se proeminentes. Isso se comprova ao se analisar os gráficos de discrepância em função da umidade (FIGURA 53).

Na FIGURA 51 destaca-se o comportamento das séries ao longo dos 3 primeiros meses da campanha. Estando a umidade abaixo do limiar citado, verifica-se uma melhor correspondência entre todas as técnicas.

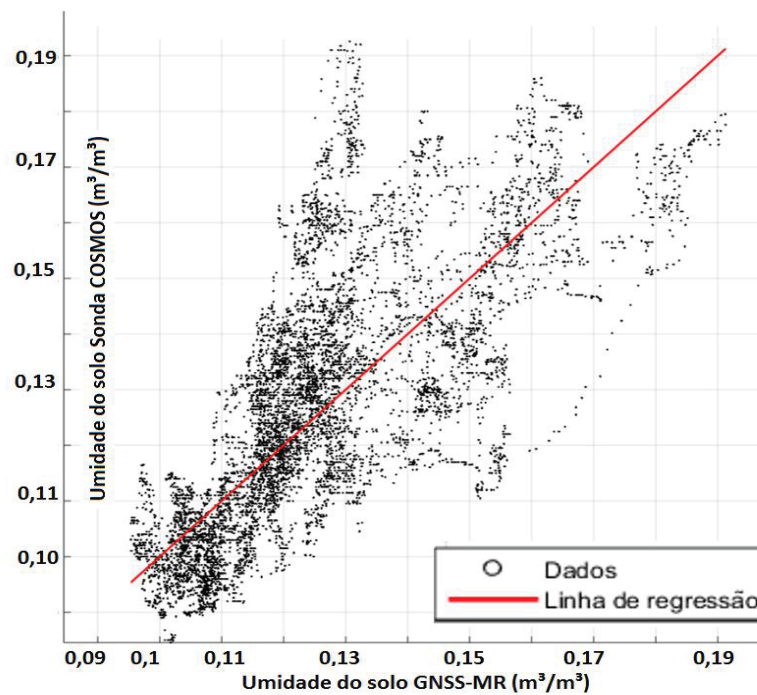
FIGURA 51 – UMIDADE DO SOLO (3 PRIMEIROS MESES)



FONTE: O autor (2019).

Na FIGURA 52 é ilustrada a dispersão entre a série GNSS-MR (RS2P) e a sonda COSMOS.

FIGURA 52 – DISPERSÃO: RS2P X COSMOS



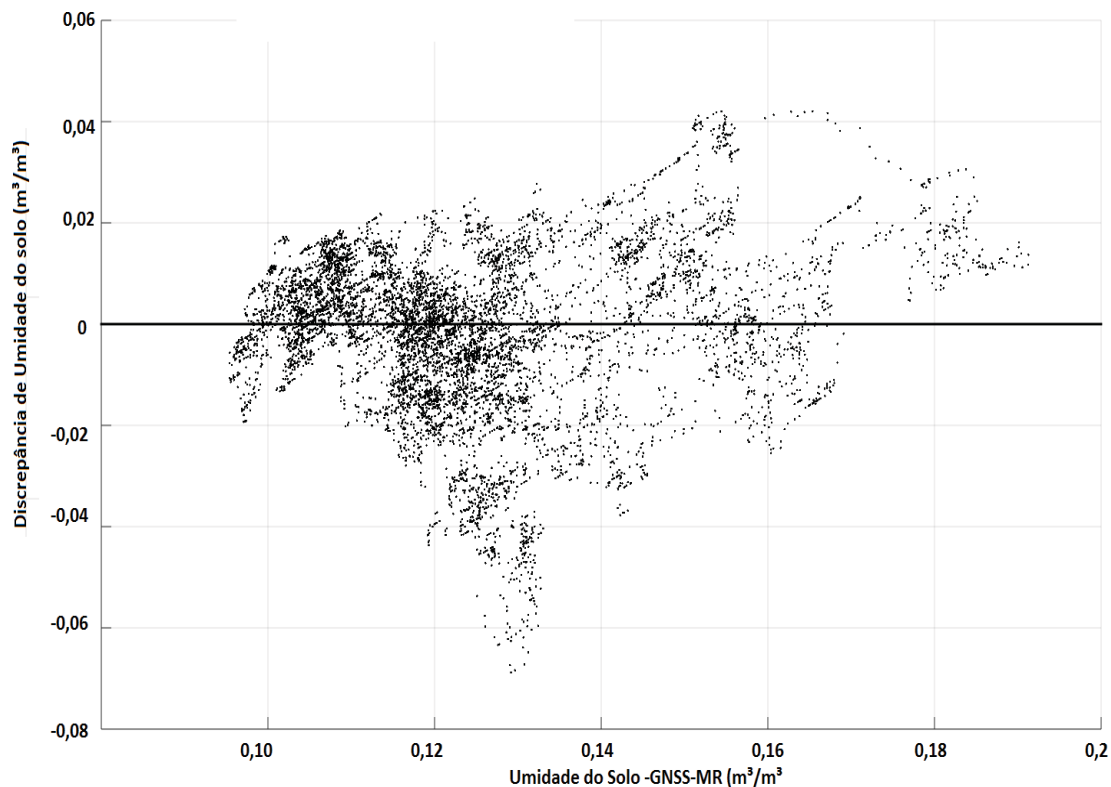
FONTE: O autor (2019).

A partir destes conjuntos de dados definiu-se os coeficientes do polinômio que permite converter a fase refletométrica em umidade do solo, sendo estes: 0,0029 e 0,12232 (coeficientes de ajuste).

As discrepâncias entre a série temporal GNSS-MR (RS2P) e a da sonda COSMOS em função da umidade do solo são apresentadas na FIGURA 53. As discrepâncias têm magnitudes predominantemente entre $\pm 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Com o aumento da umidade (acima de $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^3$) a magnitude das discrepâncias aumenta, contudo, ao longo de todo o período, verifica-se que estas discrepâncias se mantêm entre $\pm 0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

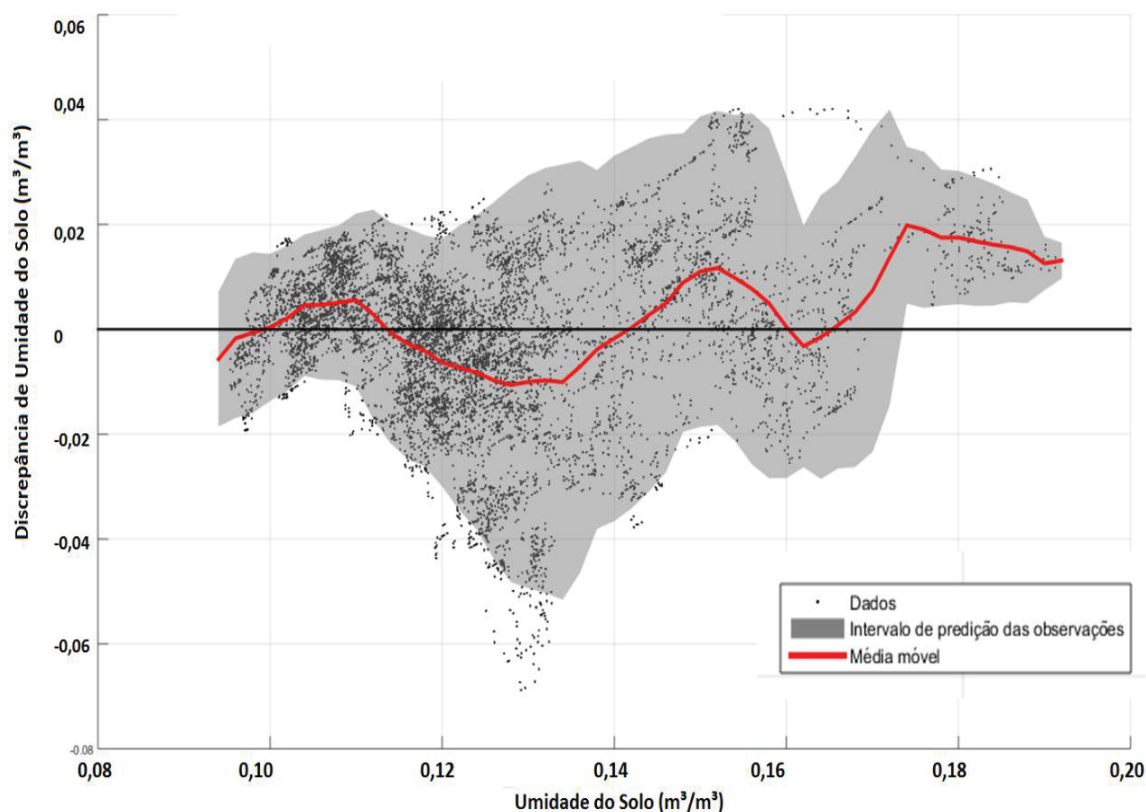
FIGURA 53 – DISCREPÂNCIA: RS2P X COSMOS



FONTE: O autor (2019).

A FIGURA 54 caracteriza inferências estatísticas efetuadas sobre estas séries. Destaca-se a média móvel (linha vermelha) das discrepâncias. O desvio padrão móvel (faixa cinza) representa o intervalo de predição das informações com 95%, a partir do qual efetua-se o controle de qualidade dos dados.

FIGURA 54 – CONTROLE DE QUALIDADE: RS2P X COSMOS



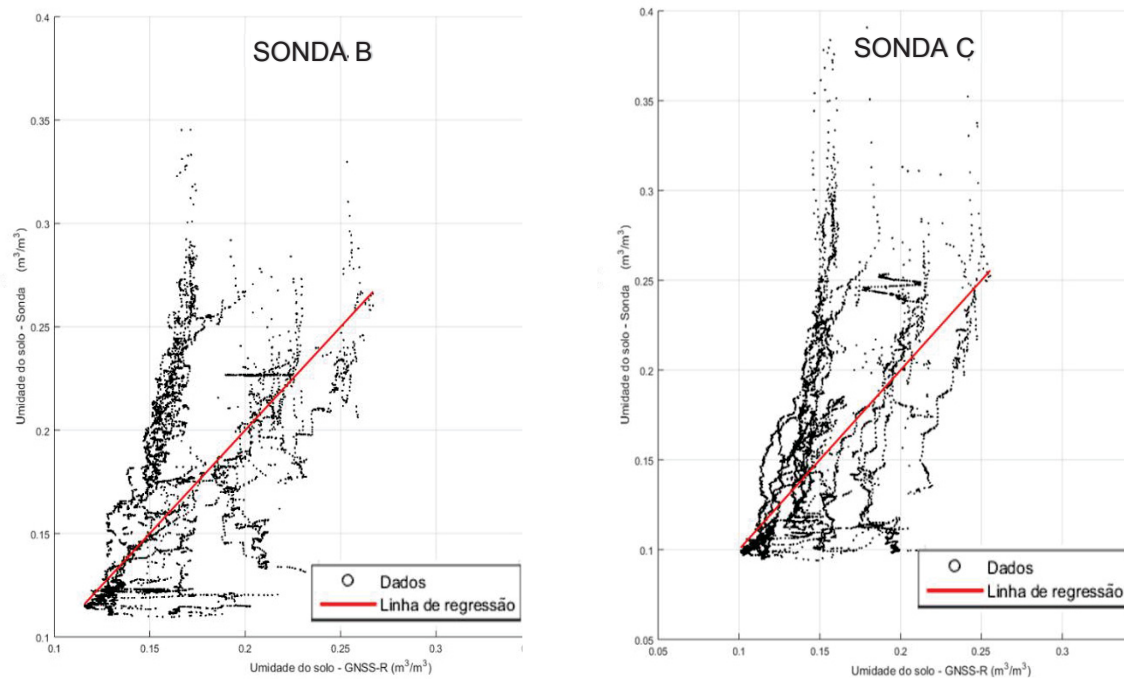
FONTE: O autor (2019).

A série temporal de umidade por GNSS-MR (RS2P) também foi comparada com as séries das sondas PR1. A FIGURA 55 apresenta os valores de dispersão, tem-se à esquerda a sonda B e a direita a sonda C. Percebe-se que a dispersão dos dados é acentuada nas duas sondas, sendo maior na sonda C, como era de se esperar tendo em vista os valores de correlação apresentados anteriormente. Os coeficientes de ajuste entre o GNSS-MR e a Sonda B (esquerda) foram 0,0042 e 0,15799. Para a sonda C, estes coeficientes foram 0,0049 e 0,1450.

A discrepância entre a série GNSS-MR (RS2P) e a sonda B em função da umidade é indicada na FIGURA 56. Observa-se a ocorrência de padrões lineares nas discrepâncias. Isto ocorreu em função dos picos acentuados obtidos pelas sondas PR1, que está ligado a maior sensibilidade deste instrumento às variações de umidade do solo. As inferências estatísticas relacionadas a estas séries são caracterizadas através da FIGURA 57. Verifica-se que com a umidade próxima de 0,16 m³/m³, tem-se recorrência de discrepâncias compreendidas entre - 0,05 e - 0,1 m³/m³, isso fez

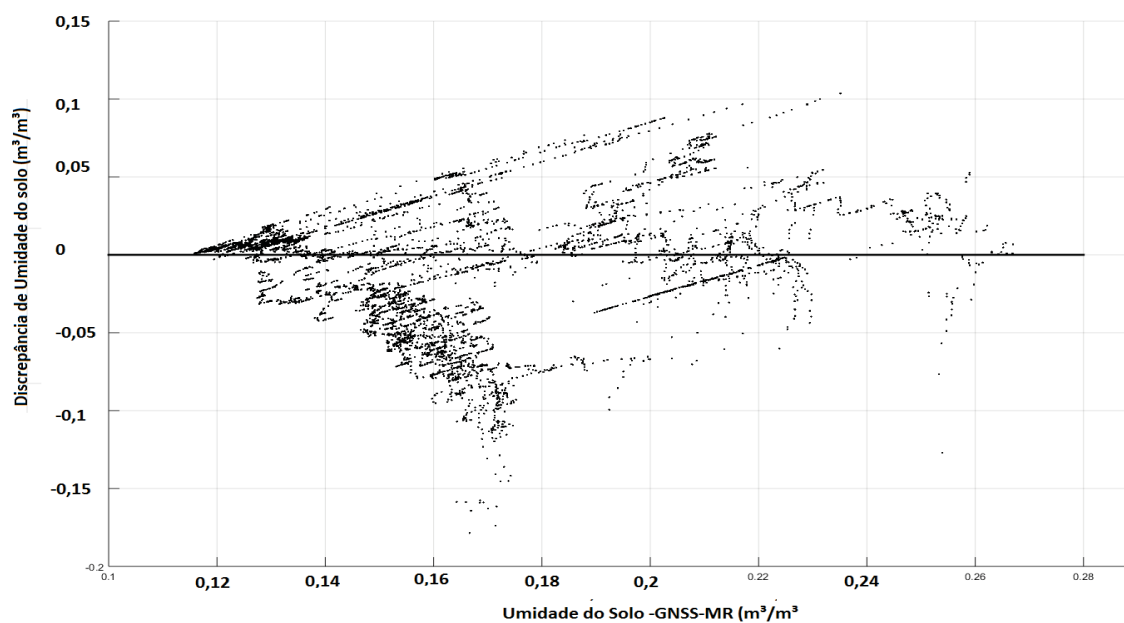
com que o intervalo de predição das discrepâncias se estendesse para esta região, atingindo a máxima de $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

FIGURA 55 – DISPERSÃO: RS2P X SONDAS PR1



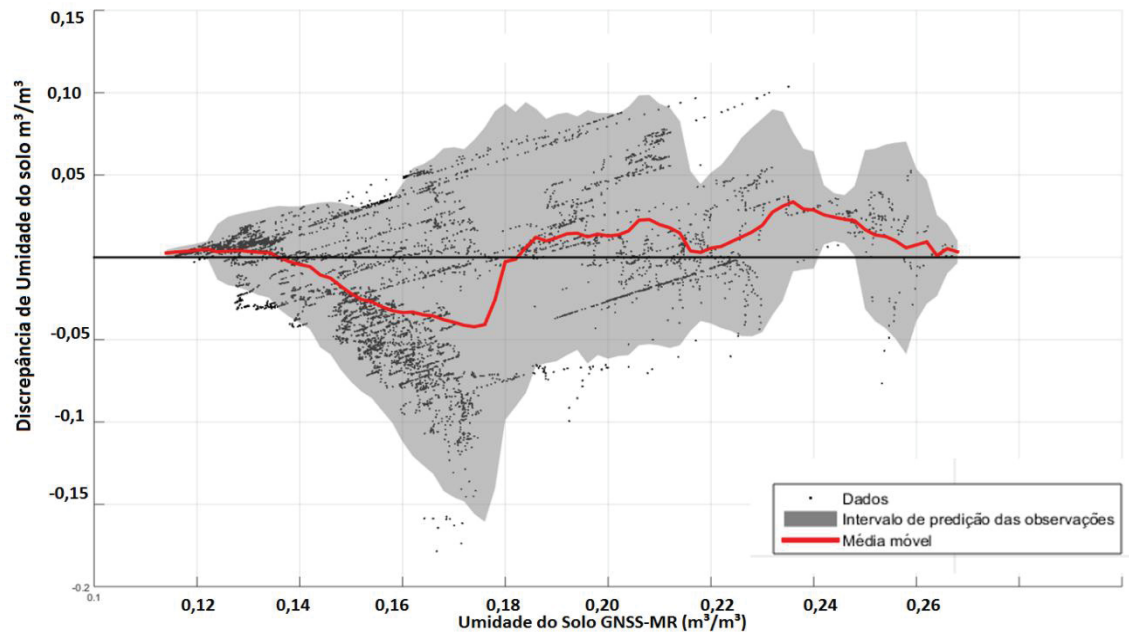
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 56 – DISCREPÂNCIA GNSS-MR (RS2P) X SONDA B



FONTE: O autor (2019).

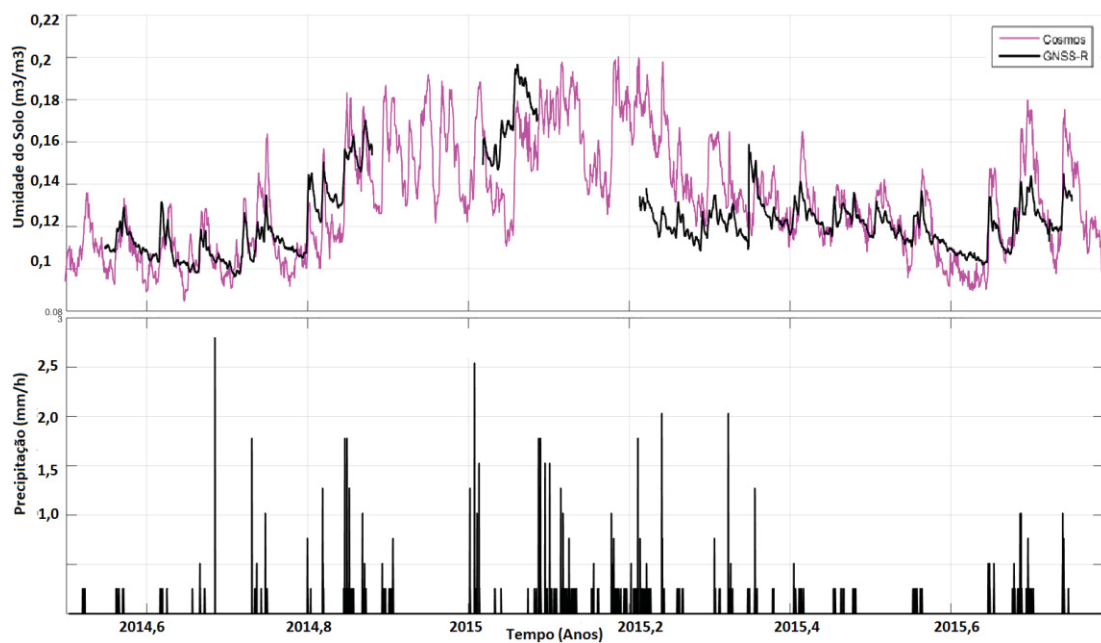
FIGURA 57 – CONTROLE DE QUALIDADE: RS2P X SONDA B



FONTE: O autor (2019).

Por fim, avaliou-se a correspondência entre a série GNSS-MR (RS2P) e os dados de precipitação obtidos por meio do pluviômetro. Na FIGURA 58 mostra-se a composição que proporcionou os melhores resultados.

FIGURA 58 – CORRESPONDÊNCIA GNSS-MR – COSMOS – PRECIPITAÇÃO



FONTE: O autor (2019).

Nota-se que após decorrido um evento de precipitação, a frente de umidade vai se aprofundando no solo. Se a precipitação ocorre sobre o solo seco, a umidade permanece inicialmente mais próxima à superfície por um período, posteriormente vai ganhando profundidade.

Contrariamente, quando o solo está com bastante umidade e não ocorre precipitação, o solo vai perdendo umidade através da evaporação ou infiltração permanecendo mais úmido com a profundidade e mais seco próximo a superfície.

Neste âmbito, como as determinações pelo GNSS-MR se referem a umidade mais próxima à superfície, e como os eventos de precipitação ocorreram regularmente no local de estudo, observa-se que os valores de umidade determinados pelo GNSS-MR, se mantêm predominantemente acima dos valores da sonda COSMOS.

Larson et al. (2010), indicam que após eventos de precipitação o GNSS-MR superestima a umidade do solo. Contudo, nesta pesquisa isto não pode ser afirmado, pelo fato de que, dada as limitações das sondas PR1 já indicadas, ambas apresentaram valores de umidade (referentes a profundidade 10 cm) superiores aos obtidos com o GNSS-MR e com a sonda COSMOS ao longo do monitoramento.

No que tange a sonda COSMOS, as profundidades efetivas são variáveis em função da umidade, as quais se mantiveram em sua grande maioria entre 20 e 25 cm (FIGURA 28).

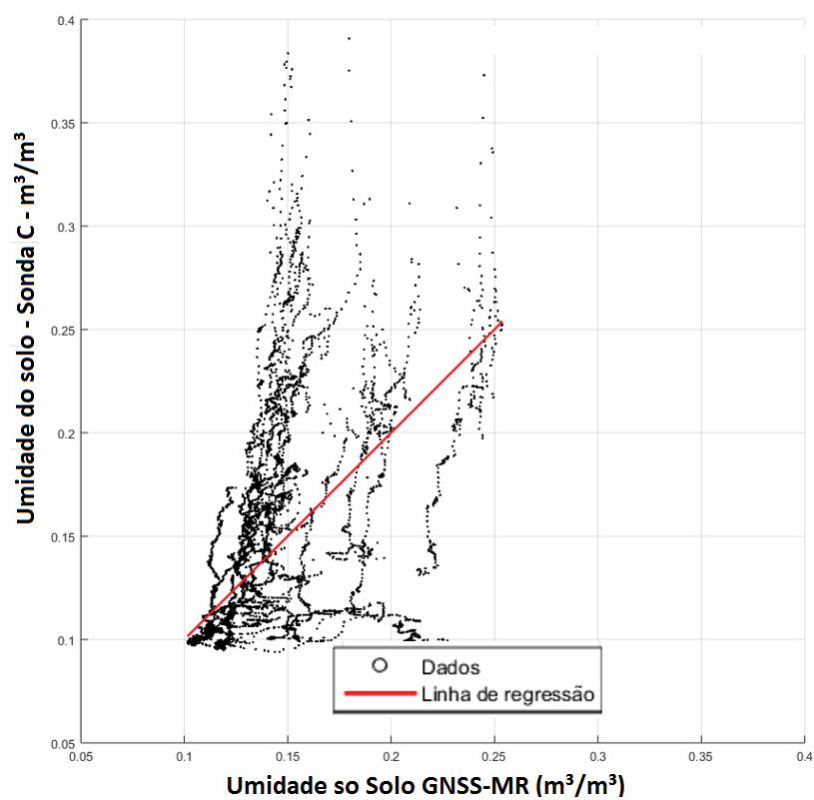
Considerando que a umidade do solo se manifesta de maneira diferente em função da profundidade, conforme visto na FIGURA 26, e que estas determinações foram efetuadas sob diferentes profundidades, o GNSS-MR pode não estar superestimando a umidade, mas sim, medindo-a em menor profundidade.

4.6.2 Sinal RS1P

O sinal RS1P que apresentou os resultados menos correlacionados com as sondas, sendo o pior caso a combinação com a sonda C. Na FIGURA 59 destaca-se a dispersão dos dados entre as séries temporais GNSS-MR (RS1P) e sonda C.

Verifica-se que os dados não acompanham a linha de regressão, eles têm um certo padrão linear devido a diferença entre os picos, em face dos picos acentuados da sonda C.

FIGURA 59 – DISPERSÃO GNSS-MR(RS1P) X SONDA C



FONTE: O autor (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desta pesquisa efetuou-se a avaliação do desempenho do GNSS-MR na determinação da umidade do solo ao longo de 16 meses. Foram geradas séries temporais respectivas a cada sinal GNSS rastreado, C/A-L1 (GS1C) e L2C (GS2X) do GPS (G), e C/A-L1 (RS1C), P-L1 (RS1P), e P-L2 (RS2P), do GLONASS (R).

Para validar os dados de umidade do solo por GNSS-MR foram geradas séries temporais referentes a três sondas de capacitância (PR1 – A, B e C) e uma sonda da rede COSMOS. Efetuou-se a avaliação do desempenho destes equipamentos, optando-se por não utilizar os dados provenientes da sonda de capacitância A devido a recorrência de dados espúrios e inconsistências. As sondas B e C apresentaram variabilidade de dados, principalmente nos picos relativos aos eventos de precipitação.

Pode-se indicar possíveis fatores que contribuíram com a ocorrência de dados espúrios e inconsistências na sonda A, como as limitações deste tipo de equipamento, como já indicado na Seção 2.1.1.2, a possível heterogeneidade da composição do solo pode ter impactado nas diferenças entre as sondas.

A partir das imagens dos levantamentos verificou-se que a sonda A foi devidamente instalada, verticalizada e inserida no solo até a adequada profundidade de referência (10 cm) que é indicada no bastão. Assim, devido as inconsistências obtidas com esta sonda, pode-se supor que ela foi instalada na proximidade de rochas ou que permaneceram lacunas de ar provenientes da instalação nas proximidades do sensor, o que altera a propagação do campo eletromagnético no solo.

Outro fator de fundamental importância em se tratando deste tipo de equipamento é que, embora os fabricantes forneçam valores médios para os coeficientes do polinômio de conversão em umidade do solo, um processo de calibração do instrumento visando a determinação de coeficientes mais realísticos do solo local é recomendado. Nesta pesquisa a calibração da sonda não foi efetuada, pois foram utilizados os coeficientes disponibilizados pela fabricante, todavia, a precisão adotada como referência para este instrumento $0,06\text{m}^3/\text{m}^3$ contempla esta condição, conforme determinado pela Delta-T Devices Ltd (2001).

Pesquisas anteriores, como o relatório da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) (2003), mostraram que este tipo de sonda teve o pior desempenho em relação a demais equipamentos como uma sonda de nêutrons

e uma sonda TDR, portanto os resultados obtidos com estas sondas estão de acordo com as limitações instrumentais do equipamento.

A sonda COSMOS tem precisão nominal muito superior às destas sondas de capacitância, assim foi adotada como referência para avaliar a umidade do solo. Contudo, devido ao seu alcance ter sido de aproximadamente 300 m, apresentam variabilidade de dados em função dos diferentes níveis de umidade que esta área contempla. Desta forma, efetuou-se o cálculo de uma série temporal a partir da média móvel destes dados.

A profundidade de referência das determinações efetuadas por este equipamento é variável em função do teor de umidade, tendo sido em média de 25 cm. Nesta profundidade a umidade do solo se manifesta de maneira diferente da profundidade obtida com o GNSS-MR (cerca de 5 cm). Apesar disto, estes dados foram adotados para efetuar o ajuste da fase refletométrica das séries GNSS-MR e convertê-las em umidade do solo pelo fato destas determinações serem mais representativas da área de estudo (não pontuais), terem melhor precisão nominal, além disto, passam por um controle de qualidade.

Ao se efetuar as comparações entre as séries temporais, verificou-se que ao empregar o sinal comumente dito P da L2 do GLONASS (RS2P), obteve-se correlação superior a 73% com a série provenientes da sonda COSMOS. Quando comparada (RS2P) com a sonda PR1 B esta correlação foi de 55%, e com a sonda C de 52%.

O sinal que apresentou a menor correlação foi o sinal P pela portadora L1 (RS1P) também da constelação GLONASS, tendo correlação de 65% com a sonda COSMOS, 47% com a sonda B e de 42% com a sonda C.

Tomando como referência a umidade do solo determinada pela sonda COSMOS, os melhores resultados foram obtidos com os sinais: RS2P que se refere ao P da frequência G2 (GLONASS); e o GS2X, L2C da L2 do GPS. O sinal legado C/A-L1 (GPS) e P-G1 (GLONASS) proporcionaram os piores resultados tendo desempenho semelhante (correlação de 65% com a sonda COSMOS).

Investigações mais robustas se fazem necessárias no que tange a performance dos diferentes sinais no GNSS-MR. Observa-se que os melhores resultados foram dados a partir de sinais modulados pela portadora L2, ao passo que os piores foram modelados pela portadora L1, com isto pode-se sugerir que este desempenho pode estar ligado com os diferentes comprimentos de onda entre estas portadoras. Além disto, conforme Nievinski (2013), a transmissão FDMA do sistema

GLONASS o torna menos suscetível a interferências inter-canais que o GPS, que utiliza CDMA.

A utilização de sinais GPS e GLONASS proporcionou melhor cobertura na área de interesse em termos de azimutes, tendo em vista as diferentes trajetórias dos satélites, bem como, em função da maior inclinação das órbitas GLONASS. Isto contribuiu para abundância de dados minimizando o problema de obstruções.

Ainda que se tenha verificado o aumento na correlação com a sonda COSMOS de 18% considerando o sinal RS2P em relação ao sinal RS1P, verifica-se que o instrumento utilizado para comparação com os dados GNSS-MR foi mais impactante na correlação do que o sinal GNSS empregado.

Concernente a estas correlações entre as séries se deve considerar que as áreas de alcance, bem como, as profundidades de referência em cada uma destas técnicas empregadas são diferentes. Sendo pontual e com profundidade de 10 cm para as sondas de capacitância; cerca de 30 m e 5 cm para o GNSS-MR; e de 300m com profundidade média de 25 cm para a COSMOS. Estes fatores induzem espontaneamente a discrepâncias entre os conjuntos de dados, devendo ser considerado também que estes equipamentos têm diferentes níveis de precisão nominal.

Avaliando-se os gráficos de discrepância percebe-se que ela é proporcional a umidade do solo. Isso foi verificado em todos os sinais e equipamentos. Portanto, com o aumento da umidade obteve-se o aumento da discrepância entre os métodos, mesmo para as sondas de mesmo modelo (PR1).

Apesar das diferenças obtidas pelos diferentes métodos, verifica-se que todos os métodos respondem simultaneamente frente a variações de umidade do solo. Isso mostra que o GNSS-MR foi eficaz na detecção das variações de umidade do solo tendo como base curvas de umidade descritas por sondas de capacitância e por uma sonda COSMOS. Além disto, comprovou-se que as curvas de séries temporais se demonstraram sincronizadas com eventos de precipitação, os quais estão diretamente ligados a umidade do solo.

Estes resultados mostram que a Refletometria GNSS via técnica GNSS-MR, comprovou-se como uma metodologia alternativa para monitoramento da umidade do solo. Esta pesquisa foi a primeira efetuada no tema abordado em nível de Brasil. O GNSS-MR aplicado no monitoramento da umidade do solo pode vir a contribuir com diversas áreas, dentre as quais na agronomia, que é uma das principais economias

do país, e concomitantemente ao meio ambiente, no que concerne ao manejo e uso sustentável de água na irrigação.

Através desta técnica podem ser empregados equipamentos GNSS convencionais e mesmo estações GNSS existentes, como a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), bem como, séries históricas relativas a estas estações, o que pode contribuir para estudos que envolvam longa série de dados, tais como estudos do sistema climático.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros:

- Avaliar a umidade do solo a partir de nova amostragem dos dados COSMOS considerando profundidades coerentes às de alcance do GNSS-MR entre 2,5 e 7,5 cm, conforme citado.
- Correlacionar os resultados à variáveis ambientais como a temperatura.
- Efetuar uma nova campanha de levantamentos, mesmo que em menor duração, a fim de se efetuar determinações da umidade do solo por meio do método gravimétrico, ao longo da área correspondente a abrangência do GNSS-MR e, com isto, aperfeiçoar o ajuste da fase refletométrica.
- Desenvolver o método ao ponto de que ele possa ser usado como uma ferramenta que detecte a umidade em tempo real, o que envolveria o processo de automação, e poderia ser largamente utilizado em estações já existentes, como estações da RBMC.
- Ampliar o algoritmo refletométrico para que ele passe a considerar a influência da vegetação, bem como, da topografia da superfície na reflexão dos sinais
- No futuro, este algoritmo poderá ser estendido para abarcar os sinais dos demais sinais, como o L5 e L1C DO GPS e L3 do GLONASS, como também os demais sistemas GNSS como Galileo.

REFERÊNCIAS

- BILICH, A; AXELRAD, P; LARSON, K. M. Scientific Utility of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) Reported by Geodetic GPS Receivers. **ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division**, [s.l.], p. 1999 – 2010, 2007.
- BILICH, A.; LARSON, K. M. Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). **Radio Science**, [s.l.], v. 42, n. 6, p.1-16, 28 nov. 2007. American Geophysical Union (AGU). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2007rs003652>.
- BILICH, A.; LARSON, K. M.; AXELRAD, P. Modeling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Boliva. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, [s.l.], v. 113, n. 4, p.1-12, 1 abr. 2008. Blackwell Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1029/2007jb005194>.
- BONIFACE, K; Walpersdorf, A.; Guyomarc'H, G.; Deliot, Y.; Karbou, F.; Vionnet, V.; Nievinski, F. G. **GNSS reflectometry measurement of snow depth and soil moisture in the French Alps**. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), [s.l.], p.5205-5207, jul. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/igarss.2015.7327007>.
- CALEECHURN, D. **Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques**. , n. March, p. 2009. Universitat Politècnica de Catalunya, Final Project, Barcelona, 2009.
- CARDELLACH, E. et al. GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets. **Radio Science**, v. 46, n. 5, 2011.
- CHEW, C. C; SMALL, E. E.; LARSON, K. M.; ZAVOROTNY, V. U. **Effects of Near-Surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil Moisture**. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Transactions On Geoscience and Remote Sensing, [s.l.], v. 52, n. 1, p.537-543, jan. 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2013.2242332>.
- CHEW, C. C.; SMALL, E. E.; LARSON, K. M. An algorithm for soil moisture estimation using GPS-interferometric reflectometry for bare and vegetated soil. **Gps Solutions**, [s.l.], v. 20, n. 3, p.525-537, 31 maio 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-015-0462-4>.
- COSTA, B. F. D. **Reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação do conteúdo de água em solos tropicais do distrito federal**, 2017. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- DELTA-T DEVICES LTD, **User manual for the profile probe type PR1**. Version PR1-UM-01-2. Delta-t Devices Ltd, Cambridge – UK, 2001.

DESILETS, D.; ZREDA, M.; FERRÉ, T. P. A. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 46, n. 11, p.1-7, nov. 2010. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009wr008726>.

EUA. **Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics**. Disponível em <<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em: 04 jul. 2018.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Comparison of Soil-Moisture Sensors between Neutron Probe, Time-Domain Reflectometry and Capacitance Probe**. Report of the FAO/IAEA Final Consultants Meeting. Viena, Áustria. 2003

GONÇALVES, A. S.; WALTER, F. **Análise da Reflexão Especular do Sinal do Multicaminho**. Artigo. Divisão de Engenharia Eletrônica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. São José dos Campos, SP – Brasil, 2005.

GURTNER, W.; ESTEY, L. **RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.03.**, International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104), 2015.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. New York, 2001. Springer. 5ª ed.

HUINCA, S. C. M.; **Calibração Relativa de Antenas GNSS na BCAL – UFPR** / Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009

INSIDE GNSS MAGAZINE. **About GLONASS**. [s.l.], 2019 em: <<https://insidengss.com/about-glonass/>>. Acesso: 01 mar. 2019.

JENSEN, K. et al. Assessing L-Band GNSS-Reflectometry and Imaging Radar for Detecting Sub-Canopy Inundation Dynamics in a Tropical Wetlands Complex. **Remote Sensing**, v. 10, n. 9, p. 1431, 7 set. 2018.

JIA, Y.; PEI, Y. Remote Sensing in Land Applications by Using GNSS-Reflectometry. **Recent Advances and Applications in Remote Sensing**. p. 65–88, 2018. InTech.

JIN, S.; CARDELLACH, E.; XIE, F. **GNSS Remote Sensing - Theory, Methods and Applications** [s.l.], p.3-24, 2014. Springer Netherlands. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7482-7>.

KATZBERG, S. J.; TORRES, O.; GRANT, M. S.; MASTERS, D. Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: Results from SMEX02. **Remote Sensing of Environment**, [s.l.], v. 100, n. 1, p.17-28, jan. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.09.015>.

KRUEGER, C. P., **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito Marinho**. Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1996

KRUEGER, C. P. **Posicionamento por satélites**. Apostila do Curso de Especialização em Geotecnologias – Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

LAGO, B. L. **Estudo de raios cósmicos galácticos com o Observatório Auger**. 2007. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Programa de Pós-graduação em Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

LARSON, K. M. GPS interferometric reflectometry: applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, [s.l.], v. 3, n. 6, p.775-787, 1 jul. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1167>.

LARSON, K. M.; BRAUN, J. J.; SMALL, E. E.; ZAVOROTNY, V. U.; GUTMANN, E. D.; BILICH A. L. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content. **Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.91-99, mar. 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2009.2033612>.

LARSON, K. M.; LÖFGREN, J. S.; HAAS, R. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 8, p. 1301–1310, 2013. Elsevier Ltd.

LARSON, K. M.; NIEVINSKI, F. G. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. **Gps Solutions**, [s.l.], v. 17, n. 1, p.41-52, 4 mar. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-012-0259-7>.

LARSON, K. M.; GUTMANN, E.D.; ZAVOROTNY, V. U; AXELRAD, P.; BRAUN, J. J.; WILLIAMS, M. W.; NIEVINSKI, F.G. **Can we measure snow depth with GPS receivers?** In: Geophysical Research Letters. v. 36, N. 17, 17502, 2009.

LARSON, K. M.; SMALL, E. E. Estimation of Snow Depth Using L1 GPS Signal-to-Noise Ratio Data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [s.l.], v. 9, n. 10, p.4802-4808, out. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2015.2508673>.

LARSON, K. M.; SMALL, E. E.; GUTMANN, E.; BILICH, A.; AXELRAD, P.; BRAUN, J. **Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results**. **Gps Solutions**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.173-177, 21 ago. 2007. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-007-0076-6>.

LARSON, K. M.; SMALL, E. E.; GUTMANN, E. D; BILICH, A. L.; BRAUN, J. J.; ZAVOROTNY V. U. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 35, n. 24, p.1-5, 24 dez. 2008. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2008gl036013>.

Leick, A. GPS Satellite Surveying, 2a edição, New York, John Wiley & Sons, 1995. ISBN: 0-471-30626-6

LOFGREN, J. S. **Local Sea Level Observations Using Reflected GNSS Signals**. 2014. 62 f. Tese (Doutorado) - Curso de Thesis For The Degree Of Doctor Of Philosophy, Department Of Earth And Space Sciences, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, 2014.

MARTIN-NEIRA, M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): application to ocean altimetry. **ESA J**, p. 331–355, 1993. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/279897829>>.

MENDES, P. C. DE S. **Caracterização De Um Sensor Para Medição De Umidade Do Solo Com Termo-Resistor a Temperatura Constante**, 2006. Universidade Federal da Bahia. Disponível em: <<http://www.ppgee.eng.ufba.br/teses/ac6732a9863784f9755479cd130662e4.pdf>>.

MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e aplicações**. São Paulo, 2008, Editora UNESP, 2ª ed.

MWALE, S. S.; AZAM-ALI, S. N.; SPARKERS, D. L. Can the PR1 capacitance probe replace the neutron probe for routine soil water measurement. **Soil Use and Management**, Londres, v.21, n.3, p. 340-347, 2005.

NIEVINSKI, Felipe Geremia. **Forward and Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Monitoring**. 2013. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Aerospace Engineering Sciences, Department Of Aerospace Engineering Sciences, University Of Colorado, Colorado, 2013.

NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications In: **GPS Solution**. V. 18, p.309-322, 2013.

NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. An open source GPS multipath simulator in Matlab/Octave. In: **GPS Solution**. V. 18, p.473-481, 2014a.

NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation – Part I: Formulation and Simulations. In: **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. V.52, p. 6555-6563, 2014b.

NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation – Part II: Application and Validation. **IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing**, [s.l.], v. 52, n. 10, p.6564-6573, out. 2014c. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2013.2297688>.

NIEVINSKI, F. G., MONICO, J. F. G.; **GPS como um sensor remoto**. In: PARANHOS FILHO, A. C.; MIOTO, C. L.; MARCATO JUNIOR, J.; CATALANI, T. G. T. (Org.). Geotecnologias em Aplicações Ambientais. 1ed. Campo Grande: Editora da UFMS, 2016, v.1, p.234-251.

NIEVINSKI, F. G. et al. GPS Diffractive Reflectometry: Footprint of a Coherent Radio Reflection Inferred From the Sensitivity Kernel of Multipath SNR. **Ieee Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing**, [s.l.], v. 9, n. 10, p.4884-4891, out. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2016.2579599>.

OCHSNER, Tyson E. et al. State of the Art in Large-Scale Soil Moisture Monitoring. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 77, n. 6, p.1888-1923, 2013. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0093>.

PELOWITZ, D. B.: **MCNPX user's manual**, version 5, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2005.

RIVERA VILLARREYES, A. C. **Cosmic-ray Neutron Sensing for Soil Moisture Measurements in Cropped Fields**, 2013. University of Potsdam, Germany.

ROBB, G. **Circularly Polarized Antennas Explained, Without The Math**. Versão 5. Antenna Test Lab. 2017.

ROESLER, Carolyn; LARSON, Kristine M. Software tools for GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR). **Gps Solutions**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.2-10, 16 jun. 2018. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-018-0744-8>.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; BOSCH-LLUIS, X.; CAMPS, A.; VALL-LLOSSERA, M.; VALENCIA, E.; MARCHAN-HERNANDEZ, F.; RAMOS-PEREZ, I. Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques: Experimental results over a bare soil field. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 11, p. 3616–3624, nov. 2009.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N; CAMPS, A.; VALL-LLOSSERA, M.; BOSCH-LLUIS, X.; MONERRIS, A.; RAMOS-PEREZ, I.; VALENCIA, E.; MARCHAN-HERNANDEZ, F.; MARTINEZ-FERNANDEZ, J.; BARONCINI-TURRICCHIA, G.; PÉREZ-GUTIÉRREZ, C.; SÁNCHEZ, N.. Land geophysical parameters retrieval using the interference pattern GNSS-R technique. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. [s.l.], v.49 n.1 jan. 2011 Disponível: Digital Object Identifier 10.1109/TGRS.2010.2049023

ROUSSEL, N., **Application de la Réflectométrie GNSS à l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto e Geodésia Espacial) – Geologia Aplicada, Universidade Toulouse III- Paul Sabatier, Toulouse - França, 2015.

ROUSSEL, N.; RAMILLIEN, G.; FRAPPART, F.; Darrozes, J.; Gay, A.; Biancale, R.; Striebig, N.; Hanquiez, V.; Bertin, X.; Allain, D. Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver. **Remote Sensing of Environment**, v. 171, p. 261–277, 2015. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.011>>. .

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York, 2003. Walter de Gruyter. 2nd revised edition.

SENEVIRATNE, S. I.; CORTI, T.; DAVIN, E. L.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E. B.; LEHNER, I.; ORLOWSKY, B.; TEULING, A. J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-science Reviews**, [s.l.], v. 99, n. 3-4, p.125-161, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>.

SILVA JUNIOR, J. J.; COLOMBO, A.; SCALCO, M. S.; SILVA, B. M.; LIMA, P. T. Calibração de sondas de capacitância para determinação de umidade em latossolo vermelho distroférrico. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 4, p.743-755, nov. 2013.

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. B. DE; VARALLO, A. C. T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, Botucatu, v. 4, n. 18, p.597-506, nov. 2013.

TABIBI, S.; NIEVINSKI, F. G.; VAN DAM, T. Statistical Comparison and Combination of GPS, GLONASS, and Multi-GNSS Multipath Reflectometry Applied to Snow Depth Retrieval. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s.l.], v. 55, n. 7, p.3773-3785, jul. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2017.2679899>.

TABIBI, S.; NIEVINSKI, F. G.; VAN DAM, T.; MONICO, J. F. G. Assessment of modernized GPS L5 SNR for ground-based multipath reflectometry applications. **Advances in Space Research**, v. 55, n. 4, p. 1104–1116, 2015. Elsevier Ltd.

TEUNISSEN, P. J.; MONTENBRUCK, O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. **Spring**, [s.l.], p.3-1303, 2017. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>.

UNAVCO (University NAVstar Consortium), (2018), **General Information – GNSS Modernization**, disponível em: <<https://www.unavco.org/projects/project-support/gnss-support/gnss-modernization/gnss-modernization.html>> (acesso: 04/06/2018).

VEY, S.; GÜNTNER, A.; WICKERT, J.; BLUME, T.; RAMATSCHI, M. Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. **GPS Solutions**, v. 20, n. 4, p. 641–654, 2016. Springer Verlag.

VILLARREYES, Carlos Andres Rivera. **Cosmic-ray Neutron Sensing for Soil Moisture Measurements in Cropped Fields**. 2013. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mathematics And Natural Sciences, Faculty Of Mathematics And Natural Sciences, University Of Potsdam, Potsdam, 2013.

ZAVOROTNY, V. U.; GLEASON, S.; CARDELLACH, E.; CAMPS, A. Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 2, n. 4, p. 8–45, 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

ZHANG, S.; ROUSSEL, N.; BONIFACE, K.; HA, M. C.; FRAPPART, F.; DARROZES, J.; BAUP, F.; CALVET, J. Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s.l.], v. 21, n. 9, p.4767-4784, 26 set. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-4767-2017>.

ZHANG, S.; CALVET, J.C.; DARROZES, J.; ROUSSEL, N.; FRAPPART, F.; BOUHOURS, G. **Deriving surface soil moisture from reflected GNSS signal observations from a grassland site in southwestern France**. In: Hydrology and Earth System Sciences. V. 22, p.1931-1946, 2018

ZREDA, M. et al. COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s.l.], v. 16, n. 11, p.4079-4099, 7 nov. 2012. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-16-4079-2012>.